

Czujnik magnetoelektryczny do pomiaru natężenia pola magnetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono realizację czujnika natężenia stałego pola magnetycznego w oparciu o kompozyty magnetoelektryczne. Element czuły sensora wykonano w postaci kompozytu ceramicznego warstwowego wykonanego w technologii Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) umieszczonego pomiędzy cewkami Helmholtza. W celu zwiększenia efektu magnetoelektrycznego kompozyt poddano procesowi polaryzacji elektrycznej w podwyższonej temperaturze. Spowodowało to prawie dwukrotny wzrost współczynnika magnetoelektrycznego. Wykazano, że w zakresie natężeń stałych pól magnetycznych poniżej 800 Oe napięcie generowane przez czujnik jest liniowo zależne od natężenia stałego pola magnetycznego.

Abstract. This paper presents the implementation of sensor based on the magnetoelectric composites for measurements of magnetic field strength. The sensing element of the sensor was made as a multilayer ceramic composite using the LTCC technology and was placed between the Helmholtz coils. In order to increase magnetoelectric effect, the composite was electrically polarized at elevated temperature. Magnetoelectric coefficient of the polarized composite is two times higher than for composite without polarizing. It has been shown, that in the range of static magnetic fields below 800 Oe, the voltage generated by the sensor is linearly dependent on the strength of a constant magnetic field. (**Magnetoelectric sensor for measurements of the magnetic field strength**).

Słowa kluczowe: technologia LTCC, kompozyt, magnetostrykcja, efekt magnetoelektryczny, czujnik pola magnetycznego

Keywords: LTCC technology, composite, magnetostriction, magnetoelectric effect, magnetic field sensor

Wprowadzenie

Materiały magnetoelektryczne są obecnie szeroko badane zarówno dla celów poznawczych jak i aplikacyjnych [1-13]. Zazwyczaj jednofazowe materiały magneto-elektryczne wykazują niewielki efekt magnetoelektryczny w temperaturze pokojowej (Cr_2O_3 , BaTiO_3), dlatego znacznie częściej w praktyce stosuje się materiały kompozytowe.

Znane są z literatury różne kompozycje materiałów magnetoelektrycznych, które z reguły wykorzystują ferroelektryczne perowskity takie jak BaTiO_3 , PbTiO_3 , $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ i ferrimagnetyczne ferryty $(\text{Ni,Zn,Cu,Co})\text{Fe}_2\text{O}_4$. Posiadają one bardzo zróżnicowane właściwości magnetoelektryczne, które determinują ich potencjalne zastosowania. Dla przykładu, w publikacji [14] opisano technologię wytwarzania oraz właściwości magnetoelektryczne kompozytów o składzie $x\text{Ba}_{0,8}\text{Pb}_{0,2}\text{TiO}_3 - (1-x)\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ($x = 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9$). Zarówno ferryt CuFe_2O_4 jak i ferroelektryk $\text{Ba}_{0,8}\text{Pb}_{0,2}\text{TiO}_3$ wytworzono konwencjonalną metodą reakcji w fazie stałej. Pomiaru efektu magnetoelektrycznego w temperaturze pokojowej wykazały, że najwyższy współczynnik magnetoelektryczny na poziomie $230 \mu\text{V}/(\text{cmOe})$ posiada kompozyt o zawartości $\text{Ba}_{0,8}\text{Pb}_{0,2}\text{TiO}_3$ wynoszącej $x = 0,7$. Współczynnik magnetoelektryczny tych kompozytów praktycznie nie zależy od natężenia stałego pola magnetycznego w zakresie od 0,5 do 6 kOe.

Znacząco większy współczynnik magnetoelektryczny uzyskano w kompozytach o składzie $y\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4 + (1-y)\text{PbZr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48}\text{O}_3$ ($y = 0, 0,15, 0,30, 0,45, 1$) wytworzonych konwencjonalną metodą reakcji w fazie stałej. Osiągnięto maksymalny współczynnik magnetoelektryczny dla kompozytu $0,15\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_2\text{O}_4 + 0,85\text{PbZr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48}\text{O}_3$ na poziomie $0,8 \text{ mV}/(\text{cmOe})$ przy natężeniu stałego pola magnetycznego wynoszącym $0,8 \text{ kOe}$ [15]. Kolejne prace badawcze doprowadziły do uzyskania bardzo wysokich wartości współczynnika magnetoelektrycznego. W publikacji [16] przedstawiono kompozyt ceramiczny zawierający ferroelektryk $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$ i ferryt $\text{Ni}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_3\text{O}_4$ (NZFO). Składniki zmieszano w proporcjach 5:1. Osiągnięto wysoki współczynnik magnetoelektryczny kompozytu ceramicznego, spiekanego w temperaturze 1250°C przez

2 h, wynoszący $64 \text{ mV}/(\text{cmOe})$ dla natężenia stałego pola magnetycznego $1,1 \text{ kOe}$ oraz $406 \text{ mV}/(\text{cmOe})$ dla natężenia stałego pola magnetycznego $0,26 \text{ kOe}$.

Jeszcze wyższy współczynnik magnetoelektryczny wynoszący $625 \text{ mV}/(\text{cmOe})$ uzyskano w kompozytach $(x)\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Cu}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4 - (1-x)\text{PbZr}_{0,8}\text{Ti}_{0,2}\text{O}_3$ dla $x = 0,25$ przy natężeniu stałego pola magnetycznego 750 Oe . Tak wysoki współczynnik magnetoelektryczny uzyskano dzięki wstępnej polaryzacji elektrycznej kompozytu w polu elektrycznym $3\text{kV}/\text{cm}$ przy temperaturze około 180°C [17].

Materiały magnetoelektryczne są stosowane w technice mikrofalowej, sensorowej, w technice pomiarowej, jako nośniki informacji o bardzo gęstym upakowaniu, jako czynniki informacji, itp. Można przewidzieć dalsze zastosowania typu funkcjonalnego tych materiałów np. w medycynie – małoinwazyjne rozruszniki serca, w technice – do produkcji prostych przetworników, głośników, siłowników, wzbudników, itp. Pojawiają się patenty, które dowodzą potencjału aplikacyjnego tych materiałów. W USA opatentowano np. narzędzia chirurgiczne zawierające elementy magnetoelektryczne, które mogą być wykorzystywane do małoinwazyjnych zabiegów chirurgicznych [18]. Zgodnie z tym opisem patentowym element magnetoelektryczny składa się z warstw piezoelektrycznych oraz magnetostrykcyjnych i umożliwia sterowanie narzędziem poprzez pole magnetyczne. Pole magnetyczne powoduje odkształcenie warstwy magnetostrykcyjnej i zmianę położenia narzędzia. Do kontroli położenia narzędzia wykorzystywane jest napięcie generowane w warstwie piezoelektrycznej. Jako materiały magnetostrykcyjne stosowane są m.in. ferryty kobaltu, niklu, litu, miedzi i manganu a jako materiał piezoelektryczny PZT, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$, $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3$.

Ponadto, są stosowane w technice mikrofalowej, sensorowej, w technice pomiarowej, jako nośniki informacji o bardzo gęstym upakowaniu, jako czynniki informacji, itp. Jedną z możliwości aplikacji materiałów magnetoelektrycznych są czujniki pól magnetycznych.

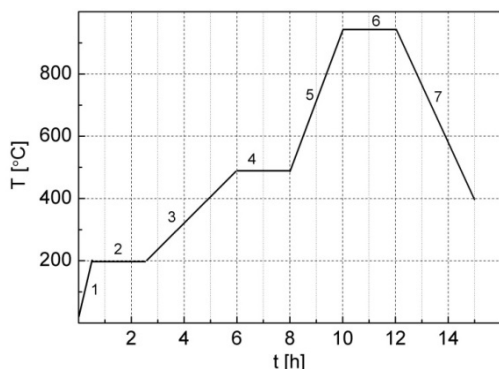
Typowe czujniki do pomiaru natężenia pola magnetycznego realizuje się w oparciu o elementy indukcyjne lub czujniki wykorzystujące efekt Halla.

Niedogodnością czujników indukcyjnych jest silna zależność sygnału wyjściowego od częstotliwości zmian pola magnetycznego, co sprawia, że amplituda sygnału wyjściowego zanika przy małych częstotliwościach. Z kolei, czujniki pola magnetycznego wykorzystujące efekt Halla, z uwagi na małą amplitudę sygnału wyjściowego, wymagają wyposażenia w precyzyjne i stabilne źródło zasilania oraz dodatkowy, skompensowany termicznie układ wzmacniający sygnał wyjściowy czujnika. Z drugiej strony, magnetoelektryczne czujniki ceramiczne charakteryzują się prostą budową, dużą niezawodnością i wykazują stosunkowo duże zmiany sygnału wyjściowego, co upraszcza układ aplikacyjny. W materiałach magnetoelektrycznych zewnętrzne pole magnetyczne indukuje polaryzację elektryczną (efekt magnetoelektryczny) poprzez mechaniczne sprzężenie pomiędzy podsystemem magnetostrykcyjnym i piezoelektrycznym. Naprężenia, powstałe w wyniku zmiany rozmiaru domen magnetycznych w materiale magnetostrykcyjnym, powodują wzrost polaryzacji domen elektrycznych w materiale piezoelektrycznym w kierunku rozciągania i spadek polaryzacji domen elektrycznych w kierunku ściskania. Zmiana polaryzacji elektrycznej jest związana ze zmianą gęstości ładunków elektrycznych w pobliżu ścian domenowych co jest przyczyną indukowania pola elektrycznego w całych domenach. Zazwyczaj materiały jednofazowe wykazują niewielki efekt magnetoelektryczny. Obecnie szczególnie nacisk kładzie się na kompozyty ferrytowo – relaksorowe, w których efekt magnetoelektryczny jest znacznie większy niż w materiałach jednofazowych.

W przedstawionym artykule omówiono konstrukcję magnetoelektrycznego czujnika natężenia stałego pola magnetycznego bazującego na spolaryzowanym kompozycie magnetoelektrycznym składającym się z warstw ferrytu $\text{NiZnCuFe}_2\text{O}_4$ rozdzielonych warstwami ferroelektryka BaTiO_3 .

Synteza materiałów oraz metodyka badań

Element czuły sensora wykonano w postaci kompozytu składającego się z magnetycznych warstw ferrytu $\text{NiZnCuFe}_2\text{O}_4$ rozdzielonych warstwami ferroelektryka BaTiO_3 . Opracowano optymalny profil spiekania kompozytu (rys.1), który obejmuje etap odparowania rozpuszczalników (2), etap wypalania składników organicznych kompozytu (4) oraz etap spiekania warstw ceramicznych w temperaturze 950°C przez 2 godziny (6).



Rys.1. Profil spiekania kompozytów wielowarstwowych: 1 – podgrzanie do temperatury odparowania rozpuszczalników, 2 – odparowanie rozpuszczalników, 3 – podgrzanie do temperatury wypału składników organicznych, 4 – wypał składników organicznych, 5 – podgrzanie do temperatury spiekania, 6 – spiekanie kompozytu, 7 – chłodzenie

Powyższy profil spiekania gwarantuje uzyskanie kompozytu bez delaminacji i pęknięć na granicach warstw

oraz nie powoduje deformacji kompozytu i powstawania obcych faz na ich granicach. Szczegółowy opis syntezy składników do wykonania kompozytu i kompozytu warstwowego opisano w literaturze [19].

W porównaniu z badaniami przedstawionymi w literaturze [19], otrzymany kompozyt dodatkowo poddany został wstępnej polaryzacji elektrycznej. Polaryzacji dokonano przez przyłożenie silnego zewnętrznego pola elektrycznego w temperaturze 80°C i 110°C w celu uporządkowania dipoli elektrycznych w warstwach ferroelektrycznych wzdłuż określonego kierunku. Następnie schłodzono kompozyt w obecności pola elektrycznego do temperatury pokojowej co niejako „zamrazało” dipole elektryczne wzdłuż kierunku pola elektrycznego. Pozwala to uzyskać bardziej efektywne oddziaływanie pomiędzy podkładem magnetycznym i ferroelektrycznym. Podczas procesu polaryzacji istnieje jednak możliwość uszkodzenia kompozytu w wyniku przyłożenia zbyt dużego pola elektrycznego w wyniku którego następuje przebicie elektryczne kompozytu.

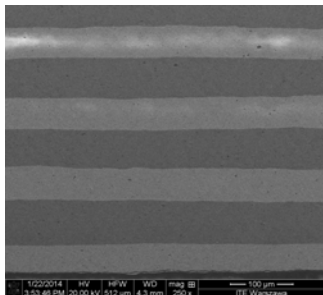
Otrzymany element czuły sensora poddano badaniami efektu magnetoelektrycznego przed i po procesie polaryzacji, a także przeprowadzono badania sygnału elektrycznego generowanego przez badany element w funkcji natężenia stałego i zmiennego pola magnetycznego.

Do pomiaru efektu magnetoelektrycznego zastosowano dynamiczną metodę pomiaru współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} [20], która pozwala na wyeliminowanie błędów pomiarowych wynikłych z występowania zjawiska Faradaya i szumów zakłócających sygnał wyjściowy. Dynamiczna metoda pomiaru współczynnika α_{ME} opiera się na wykorzystaniu superpozycji stałego (H_{DC}) i zmiennego (H_{AC}) pola magnetycznego. W praktyce, próbki w kształcie dysków lub prostopadłościanów o grubości d umieszcza się pomiędzy nabiegownikami elektromagnesu generującego stałe pole magnetyczne o natężeniu H_{DC} . Modulację pola zapewniają natomiast cewki Helmholtza zamontowane na nabiegownikach elektromagnesu i zasilane z generatora funkcyjnego. Wówczas w wyniku efektu magnetoelektrycznego pomiędzy elektrodami próbki, naniesionymi na jej płaskie powierzchnie, pojawia się napięcie. Zastosowanie wzmacniacza fazoczułego pozwala wyodrębnić z mierzonego sygnału jedynie tę składową, która charakteryzuje się częstotliwością sygnału referencyjnego podawanego z wzmacniacza fazoczułego. Pomiaru natężenia stałego pola magnetycznego (H_{DC}) dokonuje się za pomocą hallotronu umieszczonego w pobliżu próbki, natomiast amplituda zmiennego pola magnetycznego (H_{AC}) jest wyznaczana na podstawie pomiaru prądu zasilającego cewki i parametrów tych cewek (wymiary, ilość zwojów). Dynamiczna metoda pomiaru współczynnika magnetoelektrycznego pozwala więc na określenie zależności α_{ME} od H_{DC} przy zadanych wartościach amplitudy i częstotliwości zmiennego pola magnetycznego. Ponadto, metoda dynamiczna pozwala badać efekt magnetoelektryczny jako odpowiedź próbki na niewielki, sinusoidalnie zmienny sygnał użytkowy (pochodzący od zmiennego pola magnetycznego) w określonym punkcie pracy materiału magnetostrykcyjnego zależnym od H_{DC} [20]. Ma to istotne znaczenie dla określenia możliwości aplikacyjnych badanych materiałów.

Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono obrazy z mikroskopu skaningowego wykonane metodą Back-Scattered Electron (BSE) przełamów warstwowych kompozytów złożonych z naprzemiennie ułożonych warstw ferroelektryka i ferrytu. Widoczna jest dobra współpraca pomiędzy warstwami, brak delaminacji i pęknięć na granicach faz. Brak tworzenia się

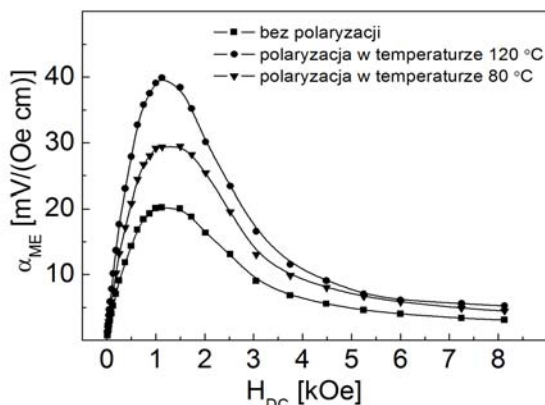
warstwy pośredniej na granicy warstw potwierdzono przy użyciu analizy metodą Energy Dispersive Spectroscopy (EDS).



Rys.2. Zdjęcia SEM mikrostruktury ceramicznego kompozytu warstwowego ferryt (ciemne warstwy)-relaksor (jasne warstwy)

Współczynnik magnetoelektryczny α_{ME} określono w temperaturze pokojowej (20°C). Próbkę przeznaczoną do pomiarów magnetoelektrycznych umieszczoną była w zewnętrznym polu magnetycznym H_{DC} wytworzonym przez elektromagnes oraz w sinusoidalnym zmiennym polu magnetycznym H_{AC} wytworzonym przez cewki Helmholtza. Pomiedzy powierzchniami próbki generowane jest napięcie wywołane efektem magnetoelektrycznym.

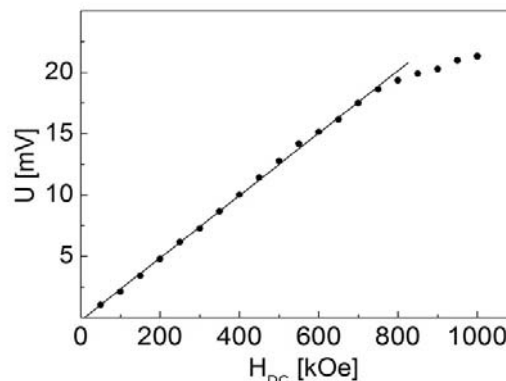
Rysunek 3 przedstawia zależności współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} przy częstotliwości zmiennego pola magnetycznego 1 kHz i amplitudzie 10 Oe. Współczynnik magnetoelektryczny najpierw rośnie, osiąga maksimum dla $H_{DC} = 1,1$ kOe, a następnie maleje ze wzrostem natężenia stałego pola magnetycznego. Spadek współczynnika magnetoelektrycznego w zależności od natężenia stałego pola magnetycznego (dla $H_{DC} > 1,1$ kOe) jest spowodowany procesem nasycenia magnetostrykcji materiału w wyniku zwiększania natężenia pola magnetycznego. Proces polaryzacji elektrycznej zwiększa wartość współczynnika magnetoelektrycznego w stosunku do próbki niespolaryzowanej o ok. 45% w temp. 80°C i o 90% w temp. 120°C.



Rys.3. Zależność współczynnika magnetoelektrycznego α_{ME} od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC} dla kompozytu warstwowego przed procesem polaryzacji i po procesie polaryzacji elektrycznej

Na rysunku 4 przedstawiono zależność napięcia generowanego pomiędzy elektrodami magnetoelektrycznego czujnika pola magnetycznego od natężenia stałego pola magnetycznego. Czujnik był umieszczony pomiędzy niewielkimi cewkami Helmholtza, które generowały sinusoidalnie zmienne pole magnetyczne o amplitudzie 4Oe. Docelowo cewki te planuje się nanieść

metodą sitodruku na ostatnie warstwy kompozytu, aby były one zintegrowane w czujniku i odizolowane od elektrod. Napięcie elektryczne generowane przez czujnik jest liniowo zależne od natężenia pola magnetycznego do około 800 Oe.



Rys.4. Zależność napięcia generowanego pomiędzy elektrodami magnetoelektrycznego czujnika pola magnetycznego od natężenia stałego pola magnetycznego H_{DC}

Podsumowanie

W przedstawionym artykule omówiono konstrukcję magnetoelektrycznego czujnika natężenia stałego pola magnetycznego. Element czuły sensora wykonano w postaci kompozytu ceramicznego warstwowego składającego się z magnetostrykcyjnego ferrytu $NiZnCuFe_2O_4$ i ferroelektryka $BaTiO_3$. W kompozycie tym występuje wyraźny efekt magnetoelektryczny porównywalny z najlepszymi magnetoelektrycznymi materiałami ceramicznymi znanymi dotychczas z literatury. Dodatkowo, proces polaryzacji elektrycznej w podwyższonej temperaturze powoduje znaczący wzrost współczynnika magnetoelektrycznego. Wykonano model czujnika w postaci kompozytu umieszczonego pomiędzy cewkami Helmholtza. Wykazano, że w zakresie natężeń stałych pól magnetycznych poniżej 800 Oe napięcie generowane przez czujnik jest liniowo zależne od natężenia stałego pola magnetycznego.

Praca naukowa finansowana przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2013/11/D/ST5/02990.

Autorzy: dr inż. Piotr Guzdek, dr inż. Wojciech Grzesiak, dr inż. Piotr Zachariasz, mgr inż. Grzegorz Kołasczyński, inż. Wojciech Smolka, Instytut Technologii Elektronowej Oddział w Krakowie, ul. Zabłocie 39, 30-701 Kraków; dr inż. Marek Wzorek, Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, E-mail: pguzdek@ite.waw.pl; grzesiak@ite.waw.pl.

LITERATURA

- [1] Grössinger R., Duong G.V., Sato-Turtelli R., The physics of magnetolectric composites, *J. Magn. Magn. Mat.*, 320 (2008), 1972-1977
- [2] Fetisov Y.K., Kamentsev K.E., Ostashchenko A.Y., Magnetolectric effect in multilayer ferrite - piezoelectric structures, *J. Magn. Magn. Mat.*, 272-276 (2004), 2064-2066
- [3] Kanamadi C.M., Kim J.S., Yang H.K., Moon B.K., Choi B.C., Jeong J.H., Magnetolectric effect and complex impedance analysis of $(x)CoFe_2O_4 + (1-x)Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ multiferroics, *J. Alloys Compd.*, 481 (2009), 781-785
- [4] Li Y.J., Chen X.M., Lin Y.Q., Tang Y.H., Magnetolectric effect of $Ni_{0.8}Zn_{0.2}Fe_2O_4/Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb_2O_6$ composites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 26 (2006), 2839-2844
- [5] Guzdek P., Grzesiak W., Wzorek M., Efekt magnetoelektryczny w kompozycie warstwowym $Ni_{0.3}Zn_{0.62}Cu_{0.08}Fe_2O_4 - PbFe_{0.5}Ta_{0.5}O_3$, *Przegląd Elektrotechniczny*, R91 NR 9/2015, 50-53
- [6] Guzdek P., The magnetostrictive and magnetolectric

- characterization of $\text{Ni}_{0.3}\text{Zn}_{0.62}\text{Cu}_{0.08}\text{Fe}_2\text{O}_4$ - $\text{Pb}(\text{FeNb})_{0.5}\text{O}_3$ laminated composite, *J. Magn. Magn. Mat.*, 349 (2014), 219-223
- [7] Solopan S.A., V'yunow O.I., Belous A.G., Tovstolytkin A.I., Kovalenko L.L., Magnetolectric effect in composite structures based on ferroelectric/ferromagnetic perovskites, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 30 (2010), 259-263
- [8] Kowal K., Jartych E., Guzdek P., Stoch P., Lisińska-Czekaj A., Czekaj D., X-ray diffraction, Mössbauer spectroscopy and magnetolectric effect studies of $(\text{BiFeO}_3)_x - (\text{BaTiO}_3)_{1-x}$ solid solutions, *Nukleonika*, 58 (2013), 57-61
- [9] Guzdek P., Wzorek M., Magnetolectric properties in bulk and layered composites, *Microelectronic International*, 32 (2015), no. 3, 110-114
- [10] Niemiec P., Bochenek D., Chrobak A., Guzdek P., Błachowski A., Ferroelectric-Ferromagnetic Ceramic Composites Based on PZT with Added Ferrite, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12 (2015), E82-E89
- [11] Duong G.V., Grössinger R., Schoenhart M., Bueno-Basques D., The lock-in technique for studying magnetolectric effect, *J. Magn. Magn. Mat.*, 316 (2007), 390-393
- [12] Guzdek P., Magnetoelektryczny kompozyt ceramiczny, patent nr P. 397945 z dn. 18.03.2016 r. przyznany przez Urząd Patentowy RP
- [13] Srinivasan G., Magnetolectric effects of magnetostrictive and piezolectric layered composites, patent nr US 7226666 B2 z dn. 05.06.2007r.
- [14] Patankar K.K., Mathe V.L., Mahajan R.P., Patil S.A., Ram Manohar Reddy, SivaKumar K.V., Dielectric behaviour and magnetolectric effect in $\text{CuFe}_2\text{O}_4 - \text{Ba}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{TiO}_3$ composites, *Mater. Chem. Phys.*, 72 (2001), 23-29
- [15] Chougule S.S., Chougule B.K., Response of dielectric behaviour on ferroelectric rich (y) $\text{Ni}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$ +(1-y) PZT ME composites, *Mater. Chem. Phys.*, 108 (2008), 408-412
- [16] Yu S., Huang H., Zhou L., Ye Y., Ke S., Structure and properties of PMN-PT/NZFO laminates and composites, *Ceram. Int.*, 34 (2008), 701-704
- [17] Kulkarni S.R., Kanamadi C.M., Chougule B.K., Dielectric and magnetolectric properties of (x) $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ /(1-x) $\text{PbZr}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{O}_3$ composites, *Mater. Res. Bull.*, 40 (2005), 2064-2072
- [18] Vishnu-Baba Sundaresan, Atulasimha J., Clarke J., Magnetolectric Surgical Tools for Minimally Invasive Surgery, patent nr US 20110077663 A1z dn. 31.03.2011r.
- [19] Guzdek P., Grzesiak W., Zachariasz P., Kołasczyński G., Właściwości magnetostrykcyjne kompozytów multiferroicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr. 9, 29-32
- [20] Fiebig M., Revival of the magnetolectric effect, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 38 (2005), R123-R152