

Kierownik:	dr inż. Michał CIEŻ
	e-mail: mciez@ite.waw.pl
	tel. (0-12) 656 51 83, fax (0-12) 656 36 26

Zespół: prof. dr hab. inż. Stanisław Nowak, mgr inż. Adam Bieńkowski, mgr inż. Barbara Gröger, dr inż. Wojciech Grzesiak, dr inż. Piotr Guzdek, dr inż. Ewa Klimiec, dr Jan Kulawik, dr inż. Andrzej Łukasik, mgr Tomasz Maj, dr Agata Skwarek, dr inż. Agata Stoch, dr inż. Dorota Szwagierczak, mgr inż. Krzysztof Witek, mgr inż. Krzysztof Zaraska, dr inż. Wiesław Zaraska

1. Projekty badawcze realizowane w 2011 r.

Zakład Mikroelektroniki realizował w 2011 r. następujące projekty badawcze:

- "Opracowanie zaawansowanych mikro-nanomateriałów i rozwiązań układowych oraz ich zastosowanie w nowoczesnych podzespołach, systemach i zintegrowanych strukturach LTCC". Etap II (projekt statutowy nr 1.06.060);
- "Opracowanie, wykonanie metodą odlewania i charakterystyka rodziny nowych folii ceramicznych przeznaczonych dla elektroniki" (projekt badawczy nr N 507 4680 38);
- "Technologia otrzymywania, właściwości elektryczne i magnetyczne oraz zastosowania ceramiczno-metalicznych kompozytów magnetycznych" (projekt badawczy nr N 507 4716 38);
- "Otrzymywanie i charakterystyka materiałów ceramicznych wykazujących właściwości multiferroiczne" (projekt badawczy nr N 507 3473 35);
- "Opracowanie układu elektronicznego do elektromodulacji nerwu błędnego ze sprzężeniem zwrotnym i jego zastosowanie do badań nad otyłością i nadciśnieniem tętniczym u zwierząt doświadczalnych" (projekt badawczy nr N 515 0793 37);
- "Opracowanie konstrukcji i technologii MEMS dla diagnostycznej aparatury medycznej" (projekt POIG);
- "Nowa generacja trójwymiarowych zintegrowanych elementów biernych i mikrosystemów technologii LTCC" (projekt w programie EUREKA E! 4570);
- "Otrzymywanie i charakterystyka nowych bezołowiowych nieferroelektrycznych materiałów ceramicznych na kondensatory z zaporową warstwą wewnętrzną" (projekt badawczy nr N N 507 2182 40);
- "Analiza występowania wiskerów i zarazy cynowej wpływających na jakość lutów bezołowiowych o wysokiej zawartości cyny" (projekt badawczy nr N N 515 5039 40);

- "Badania wpływu parametrów procesu technologicznego na skład chemiczny i strukturę amorficznych stopów rezystywnych typu Ni-P oraz Ni-Me-P, determinujące właściwości elektryczne i przydatność stopów do wytwarzania precyzyjnych rezystorów warstwowych" (projekt badawczy nr N N 515 5040 40);
- "Opracowanie i wykonanie modułów elektronicznych bezprzewodowej sieci monitorowania wód powierzchniowych oraz alarmowania o stanie zagrożenia skażeniami chemicznymi oraz ich sprzężenie z rozwiązaniami mechanicznymi i informatycznymi opracowanymi w ramach projektu rozwojowego R 02 0014 06/2009";
- "Nowoczesne materiały i innowacyjne metody dla przetwarzania i monitorowania energii" MIME (POIG 01.01.02-00-108/09-00).

2. Najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze

Prace realizowane w Zakładzie w ramach działalności statutowej oraz w ramach projektów badawczych finansowanych ze środków NCN i NCBiR koncentrowały się na rozwoju bazy materiałowej oraz inżynierii procesów koniecznych do wytwarzania wielowarstwowych struktur ceramicznych LTCC, nowych generacji czujników i podzespołów elektronicznych, a także na tworzeniu podstaw elektroniki organicznej.

Celem prac było opracowanie nowych technologii wytwarzania elementów elektrochemicznych ogniw paliwowych, wielowarstwowych struktur rezystorów nieliniowych, polimerowych warstw rezystywnych modyfikowanych nanokompozytami na bazie nanorurek węglowych. Prace badawcze koncentrowały się na syntezie materiałów, optymalizacji składów kompozytów do wytwarzania folii ceramicznych, będących podstawowymi elementami składowymi ogniw paliwowych i rezystorów nieliniowych(warystorów). Przeprowadzono badania mikrostruktur i składów folii ceramicznych. Scharakteryzowano kompozyty i wytworzone z nich elementy pod kątem właściwości elektrycznych.

Najważniejsze osiągnięcia to:

- Dobór składu i opracowanie technologii wytwarzania folii na katody perowskitowe do tlenkowego ogniwa paliwowego. Cechą wyróżniającą opracowane folie jest ich wysoka wytrzymałość mechaniczna, wysoka porowatość i doskonała współpraca z elektrolitem stałym w ogniwie paliwowym.
- Technologia wytwarzania ceramicznych folii warystorowych na bazie domieszkowanego tlenku cynku, obejmująca dobór składu folii i parametrów procesu wypalania warystorów wielowarstwowych. Wykonano wielowarstwowe warystory w technologii LTCC z platynowymi elektrodami wewnętrznymi, współspiekanymi z warstwami folii warystorowej. Przeprowadzono badania mikrostruktury, składu i właściwości elektrycznych wytworzonych folii i elementów warystorowych.

- Kompozyty polimerowe, których własności elektryczne modyfikowano składnikiem aktywnym o zróżnicowanej zawartości nanorurek węglowych.
- Opracowanie technologii wytwarzania proekologicznych systemów grzejnych w dalekiej podczerwieni. Wynikiem prac był projekt systemu, wykonanie modelu i przeprowadzeniem jego badań wstępnych.
- Opracowanie technologii wytwarzania precyzyjnych ścieżek w strukturach LTCC techniką ablacji laserowej.

Należy podkreślić, że większość badań przeprowadzono na urządzeniach technologicznych nowocześnie wyposażonej linii do produkcji układów LTCC.

2.1. Otrzymywanie i charakterystyka komponentów miniaturowych tlenkowych ogniw paliwowych

W ostatnich dwóch dekadach nastąpił gwałtowny rozwój ogniw paliwowych umożliwiajacych bezpośrednie generowanie energii elektrycznej i ciepła z energii chemicznej pochodzacej z reakcji wodoru z tlenem, która zachodzi w ogniwie elektrochemicznym. Najważniejsze zalety tych urządzeń to wysoka sprawność, duża gęstość energetyczna, duża niezawodność, długi czas życia, brak zanieczyszczenia środowiska, cicha praca i możliwość stosowania różnego rodzaju paliw. Jednym z podstawowych rodzajów ogniw paliwowych sa ogniwa tlenkowe (solid oxide fuel cells - SOFC) złożone z anody, katody i elektrolitu stałego. Każdy z komponentów tlenkowego ogniwa paliwowego musi spełniać określone wymagania. Materiały przewodzące przeznaczone na katody ogniw paliwowych powinny charakteryzować się mieszanym elektronowo-jonowym przewodnictwem elektrycznym, katalitycznym działaniem na proces redukcji tlenu, porowatościa, rozszerzalnością cieplną porównywalną z rozszerzalnością elektrolitu stałego, obojętnością chemiczną wobec elektrolitu stałego, stabilnością w utleniającej atmosferze i w wysokiej temperaturze oraz wytrzymałością mechaniczną. Warunki te spełniaja złożone, niestechiometryczne tlenki metali o strukturze krystalicznej perowskitu o ogólnym wzorze Ln_{1-x}A_xBO_{3±δ}, w których jako Ln oznaczono jony metali ziem rzadkich (np. La, Ce, Pr, Sm, Gd), jako A domieszki jonów metali ziem alkalicznych (np. Ca, Sr), a jako B jony metali przejściowych Mn, Fe, Co i Ni. Do najczęściej stosowanych perowskitowych materiałów katodowych należą La_xSr_{1-x}MnO_{3-δ}, La_xSr_{1-x}FeO_{3-δ} i La_xSr_{1-x}Fe_yCo_{1-y}O_{3-δ}. Niektóre z tych związków, jak np. La_{0,8}Sr_{0,2}MnO₃₋₈, La_{0,6}Sr_{0,4}Co_{0,2}Fe_{0,8}O₃₋₈ w postaci proszków, past lub folii dla technologii LTCC, są komercyjnie oferowanymi produktami.

Rozwój praktycznych zastosowań tlenkowych ogniw w generatorach energii elektrycznej jest uzależniony w dużym stopniu od wprowadzania tańszych materiałów na komponenty ogniwa paliwowego, obniżenia temperatury pracy i zmniejszenia kosztów wytwarzania ogniwa.

Celem zadania w projekcie statutowym było opracowanie składów i warunków odlewania, laminacji i spiekania folii oraz charakterystyka poszczególnych komponentów miniaturowych tlenkowych ogniw. W ramach drugiego etapu opracowano skład oraz metodykę wytwarzania i obróbki termicznej folii katodowych na bazie Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-δ} i Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO_{3-δ} oraz przeprowadzono charakterystykę ich właściwości.

Metodyka wytwarzania perowskitowych katod do ogniw tlenkowych

Do otrzymywania warstw katodowych opartych na tlenkach o strukturze perowskitu Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta} i Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta} zastosowano metode odlewania folii (tape casting) i współspiekania z elektrolitem stałym. Pierwszym etapem było opracowanie składów gęstw przeznaczonych do odlewania. Gęstwy sporządzono przez zmieszanie w młynku kulowym składników nieorganicznych ze starannie dobraną ilością dodatków organicznych. Skład gęstw do odlewania folii katodowych podano w tab. 1.

opartych na tienkach perowskitowych Sr _{0,8} Ce _{0,1} La _{0,1} MnO ₃₋₈ i Sr _{0,9} Ce _{0,05} La _{0,05} CoO ₃₋₈								
Składnik gestwy	Zawartość [% wag.]							
Skiddilik gystwy	$Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$	$Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta}$						
Proszek ceramiczny	50	57,2						
Poliwinylobutyral	8,1	7,0						
Olej rybi	0,5	0,6						
Glikol polietylenowy	2,4	1,7						
Ftalan dwubutylu	2,4	1,7						
Alkohol izopropylowy	18,3	16,0						
Toluen	18,3	15,9						

Tabela 1. Skład gęstw przeznaczonych do odlewania folii katodowych

Przeprowadzono syntezę związków przeznaczonych na część nieorganiczną katod Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO₃₋₈ i Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO₃₋₈ na drodze konwencjonalnej reakcji w fazie stałej odpowiednio w temperaturze 1250 i 1350°C przez 10 h. Produkty syntezy mielono przez 7 h w alkoholu izopropylowym w młynku kulowym i suszono. Skład fazowy syntetyzowanych materiałów kontrolowano przy użyciu dyfraktometru rentgenowskiego X'Pert firmy Philips. Uzyskano jednofazowe związki bez udziału dodatkowych faz.

Część nieorganiczną masy lejnej mieszano w młynku kulowym przez 3 h z częścią organiczną, w której skład wchodziły: poliwinylobutyral jako spoiwo, olej rybi jako dyspersant, glikol polietylenowy i ftalan dwubutylu jako plastyfikatory, toluen i izopropanol jako rozpuszczalniki.

Folie katodowe odlewano przy użyciu urządzenia firmy R. Mistler TTC-1200. Wylewano je na taśmę nośną z poliestrowej folii pokrytej silikonem, a następnie suszono w temperaturze pokojowej i w temperaturze 50°C przez 5 h.

Z surowych folii katodowych przy użyciu lasera E-355-3-G-OA firmy Oxford Laser wycinano odpowiedniej wielkości arkusze oraz otwory do pozycjonowania. Do pomiarów przewodnictwa elektrycznego przygotowano testowe próbki w kształcie belek o grubości 1 mm \times 2 mm. Otrzymano je przez ułożenie w stos

ok. $40 \div 60$ warstw folii katodowej grubości $40 \div 60 \ \mu\text{m}$. Próbki laminowano przy zastosowaniu prasy izostatycznej IL-4008PC firmy Pacific Trinetics Corporation pod ciśnieniem 35 MPa w temperaturze 70°C.

Następnie przeprowadzano dobór warunków wypalania folii katodowych oraz warunków współspiekania z folią elektrolitu stałego na bazie tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (YSZ). Profile wypału dobierano tak, aby zapewnić powolny wypał składników organicznych, umiarkowany stopień spieczenia katody



Rys. 1. Profil wypału wielowarstwowych próbek złożonych z ok. 50 warstw folii katodowych $Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-\delta}$ i $Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO_{3-\delta}$

i powolne chłodzenie próbki. Proces spiekania prowadzono w zakresie temperatur 1200 ÷ 1350°C przez 5 h. Na rys. 1 przedstawiono profile wypału dwóch rodzajów katod opartych na $Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$ i $Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta}$.

Charakterystyka mikrostruktury i przewodnictwa perowskitowych katod

Otrzymane folie katodowe charakteryzują się wysoką gładkością, elastycznością i wytrzymałością mechaniczną. Grubość folii katodowych po wysuszeniu wynosiła $40 \div 60 \ \mu\text{m}$. Skurcz folii na bazie Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-δ} i Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-δ} po procesie spiekania wynosił ok. 20%.

Mikrostrukturę elektrod i ich współpracę z elektrolitem stałym badano przy użyciu mikroskopu skaningowego firmy Jeol. Rysunek 2 pokazuje mikrostrukturę wielowarstwowych próbek $Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$ i $Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta}$ wykonanych metodą odlewania folii, laminacji i współspiekania. Mikrostruktura obu rodzajów katod jest porowata, co jest korzystne z punktu widzenia szybkości transportu tlenu do granicy trójfazowej gaz-elektroda-elektrolit stały, na której zachodzi reakcja elektrochemiczna redukcji tlenu. W konsekwencji porowatość elektrody wpływa pozytywnie na wydajność pracy katody w ogniwie.



Rys. 2. Obraz z mikroskopu skaningowego wielowarstwowych próbek otrzymanych metodą odlewania folii, laminacji i współspiekania: a) przełam katody $Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO_{3-\delta}$ spiekanej w 1250°C, b) zgład katody $Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-\delta}$ spiekanej w temperaturze 1350°C



Rys. 3. Obraz z mikroskopu skaningowego przełamu granicy faz elektrolit stały YSZ/katoda Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3- δ} po procesie współspiekania w 1250°C

Na rys. 3 przedstawiono przełam granicy faz elektrolit stały YSZ/katoda $Sr_{0,8}Ce_{0.1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$ po procesie współspiekania w 1250°C. Rysunek ten ilustruje dobrą kompatybilność wytwo-rzonej katody z elektrolitem stałym na bazie tlenku cyrkonu, brak delaminacji, pęknięć lub obcych wytrąceń na granicy faz.

Na rys. 4 porównano przewodność elektryczną dwóch rodzajów katod na bazie $Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO_{3-\delta}$ i $Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-\delta}$ w temperaturze 20 ÷ 850°C, wykonanych w formie wielowarstwowych laminatów spiekanych odpowiednio w temperaturze

1250 i 1350°C. Na krzywej przewodności w funkcji temperatury dla wielowarstwowej próbki katody na bazie $Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta}$ występuje bardzo wysokie maksimum na poziomie 930 S/cm w temperaturze 270°C. Wraz z dalszym wzrostem temperatury obserwuje się szybki spadek wartości przewodności do ok. 230 S/cm w temperaturze 850°C. Taki przebieg zależności sugeruje przejście od półprzewodnikowego do metalicznego charakteru przewodnictwa. W przypadku wielowarstwowej katody opartej na $Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$ wartości przewodności są znacznie niższe. Ze wzrostem temperatury przewodność rośnie w całym badanym zakresie temperatur 20 ÷ 850°C, co świadczy o półprzewodnikowym charakterze przewodzenia.



Rys. 4. Zależność temperaturowa przewodności elektrycznej dwóch rodzajów katod na bazie: a) $Sr_{0.9}Ce_{0.05}La_{0.05}CoO_{3-\delta}$, b) $Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-\delta}$

Podsumowując, perowskitowe katody $Sr_{0,9}Ce_{0,05}La_{0,05}CoO_{3-\delta}$ i $Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$ wytworzone metodą odlewania i współspiekania z elektrolitem stałym charakteryzowały się wysokim przewodnictwem elektrycznym, miały odpowiednią porowatość i wykazywały bardzo dobrą współpracę z elektrolitem stałym na bazie tlenku cyrkonu domieszkowanego tlenkiem itru.

2.2. Opracowanie funkcjonalnych folii ceramicznych i ich zastosowanie na elementy bierne w strukturach LTCC

Jedną z głównych przyczyn zakłóceń i uszkodzeń współczesnych skomplikowanych i czułych urządzeń elektronicznych są przepięcia. Ich źródłem są głównie wyładowania atmosferyczne i przełączanie urządzeń elektrycznych dużej mocy. Do ochrony układów elektronicznych przed przepięciami stosuje się warystory, ceramiczne rezystory zmienne, których rezystancja silnie zależy od napięcia. Po przekroczeniu napięcia przełączania gwałtownie maleje rezystancja warystora i prąd zmienia się ekspotencjalnie z napięciem ($I = CU^{\alpha}$, gdzie α jest współczynnikiem nieliniowości).

Konwencjonalne warystory produkowane są jako lite elementy na bazie półprzewodnikowej ceramiki opartej na ZnO, SiC, TiO₂, SrTiO₃. Najpowszechniej obecnie stosowanym materiałem na warystory jest domieszkowany tlenek cynku. W związku z postępem w zakresie miniaturyzacji i integracji, a także z poszerzaniem się zastosowań obwodów niskonapięciowych coraz częściej są wykorzystywane warystory wielowarstwowe (*multilayer varistors* – MLV) o konstrukcji analogicznej do wielowarstwowych kondensatorów, produkowane w technologii LTCC.

W drugim etapie zadania opracowano skład i sposób wytwarzania folii ceramicznych opartych na domieszkowanym tlenku cynku, przeznaczonych na elementy warystorowe. Stosując technologię LTCC wykonano wielowarstwowe elementy z platynowymi elektrodami wewnętrznymi, współspiekanymi z warstwami folii warystorowej. Przy użyciu mikroskopu skaningowego i spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (*energy dispersive spectroscopy* – EDS) przeprowadzono badania mikrostruktury i składu otrzymanych elementów. Wykonano pomiary charakterystyki prądowo-napięciowej wytworzonych testowych warystorów.

Metodyka odlewania folii oraz laminacji i obróbki termicznej elementów warystorowych

Masa lejna przeznaczona do odlewania folii warystorowej była złożona z części nieorganicznej, opartej na tlenku cynku domieszkowanym tlenkami Bi, Sb, Co, Mn, B, Si i Pr, oraz części organicznej. Skład części nieorganicznej podano w tab. 2.

Tabela 2. Skład części nieorganicznej gęstw do odlewania folii do wielowarstwowych warystorów											
Tlenek	ZnO	Bi ₂ O ₃	Sb_2O_3	CoO	MnO	Cr ₂ O ₃	B_2O_3	SiO ₂	Pr ₂ O ₃		
Zawartość [% mol]	96,95	0,129	0,257	0,594	0,495	0,116	0,069	0,495	0,895		

Część nieorganiczną gęstwy do odlewania folii warystorowej przygotowano metodą współstrącenia, prażenia w temperaturze 600°C i mielenia w młynku kulowym. W skład części organicznej wchodziły: poliwinylobutyral jako spoiwo, olej rybi jako dyspersant, glikol polietylenowy i ftalan dwubutylu jako plasty-fikatory, toluen i izopropanol jako rozpuszczalniki. Gęstwę do odlewania przy-gotowano przez zmieszanie w młynku kulowym przez 3 h części nieorganicznej z częścią organiczną.

Przygotowaną masę lejną wykorzystano do odlewania folii warystorowych. Proces ten przeprowadzono przy użyciu urządzenia firmy R. Mistler TTC-1200. Folie wylewano na taśmę nośną z poliestrowej folii pokrytej silikonem, suszono kilkanaście godzin w temperaturze pokojowej, a następnie w temperaturze 50°C. Grubość folii wynosiła 100 \div 110 µm. Wygląd elastycznej folii warystorowej zwiniętej w rolkę przedstawiono na rys. 5a. Z surowych folii warystorowych przy użyciu lasera E-355-3-G-OA firmy Oxford Laser wycinano odpowiedniej wielkości arkusze oraz otwory do pozycjonowania.

Na arkuszach surowej folii warystorowej nanoszono sitodrukiem, zgodnie z zaprojektowanym wzorem, wewnętrzne elektrody z pasty platynowej 5542 firmy ESL (rys. 5b). Następnie układano wielowarstwowe pakiety zawierające pięć lub dziesięć warstw z wewnętrznymi elektrodami przedzielonych jedną lub trzema warstwami folii warystorowej. Pakiety zamykano w próżniowo zgrzewanych woreczkach i laminowano przy zastosowaniu prasy izostatycznej IL-4008PC firmy Pacific Trinetics Corporation pod ciśnieniem 35 MPa w temperaturze 70°C.



Rys. 5. Surowa, elastyczna folia warystorowa otrzymana metodą odlewania (a) i arkusze surowej folii warystorowej z nadrukowanymi elektrodami z pasty Pt (b)

Kolejnymi operacjami było cięcie laminatów na pojedyncze warystory i ręczne nanoszenie z pasty Pt 5542 firmy ESL zewnętrznych połączeń równolegle ułożonych elektrod wewnętrznych.

Następnie przeprowadzano dobór warunków współspiekania folii warystorowych z zastosowanymi elektrodami platynowymi. Profil wypału dobierano tak, aby zapewnić powolny wypał składników organicznych zawartych w folii warystorowej i elektrodach. Proces spiekania wielowarstwowych warystorów przeprowadzono w temperaturze 1050°C przez 2 h.

Mikrostruktura i skład wielowarstwowych warystorów

Surowe folie warystorowe po procesie odlewania i suszenia charakteryzowały się wysoką gładkością, wytrzymałością mechaniczną i elastycznością. Grubość warstw ceramicznych pomiędzy wewnętrznymi elektrodami po procesie spiekania wynosiła ok. 105 µm w przypadku warystorów 10-warstwowych i ok. 160 µm w przypadku warystorów 5-warstwowych.

Na rys. 6 pokazano obrazy z mikroskopu skaningowego w elektronach odbitych (*back scattered electrons* – BSE) przełamów wielowarstwowego warystora po procesie spiekania. Mikrostruktura warstw warystorowych jest drobnoziarnista i dobrze zagęszczona. Współpraca z elektrodami platynowymi jest dobra. Nie stwierdzono występowania wytrąceń dodatkowych faz, rozwarstwień czy pęknięć powstających podczas obróbki termicznej na granicy elektroda - ceramiczna warstwa warystorowa. Oprócz dominujących większych ziaren ZnO o wielkości $1 \div 5 \,\mu\text{m}$ na obrazach z mikroskopu skaningowego widoczne są drobniejsze, submikronowe, jaśniejsze ziarna oraz krystality w kształcie igieł o innym składzie (zawierające pierwiastki o większym ciężarze atomowym).

Rysunek 6b przedstawia zdjęcie mikrostruktury przełamu warystora wraz z zaznaczonymi punktami 1–4, w których przeprowadzono analizę składu metodą EDS. Analiza punktowa wskazuje, że punkt 1 należy przypisać wnętrzu ziarna

ZnO. Obszar wokół punktu 2, odpowiadający krystalitowi o kształcie igły, zawiera cynk, prazeodym, bizmut i krzem. Wyjaśnienie składu fazowego tego rodzaju wytrąceń wymaga przeprowadzenia rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej. Można przypuszczać, że jest to ZnO, który przy niższych temperaturach spiekania może krystalizować w formie igieł, silnie domieszkowany prazeodymem, lub odrębna faza krystaliczna na bazie cynku i prazeodymu. Skład w punkcie 3 wskazuje na obecność cynku, antymonu, manganu, kobaltu, chromu. Przypuszczalnie jest to ziarno złożonego spinelu umiejscowione na granicy ziaren ZnO. Punkt 4 odpowiada elektrodzie Pt.



Rys. 6. Obrazy BSE z mikroskopu skaningowego mikrostruktury przełamu wielowarstwowego warystora

Dodatkowe fazy reprezentowane przez punkty 2 i 3 mogą przyczyniać się do zahamowania rozrostu ziaren ZnO i uzyskania drobnoziarnistej, jednolitej mikrostruktury o małym rozrzucie wielkości ziaren, pożądanej w przypadku wielowarstwowych warystorów.

Na rys. 7 przedstawiono mikrostrukturę warstwy warystorowej i analizę składu wzdłuż dwóch linii A i B. Linia A przecina duże ziarno ZnO i dwa mniejsze ziarna na granicy ziaren ZnO. Z analizy liniowej wynika, że skład mniejszych ziaren nie jest jednakowy. Jedno z tych ziaren zawiera antymon i jest wzbogacone w tlen i mangan, może więc stanowić spinel Zn₇Sb₂O₁₂, w którym część jonów jest podstawionych przez Mn. Drugie małe ziarno na granicy ziaren ZnO zawiera prazeodym, bizmut, chrom, mangan i wykazuje podwyższony udział tlenu.

Linia B przecina oprócz dużego ziarna ZnO o rozmiarze ok. 5 µm mniejsze okrągłe ziarno o średnicy poniżej 0,5 µm i trzy krystality o kształcie igieł. W obszarze igieł występuje zdecydowane wzbogacenie w prazeodym, bizmut i chrom. Obszar małego okrągłego ziarna, prawdopodobnie spinelu, związany jest z podwyższoną zawartością antymonu i manganu.

Podczas obserwacji mikrostruktury warstw warystorowych pod bardzo dużym powiększeniem (80000×) na granicach ziaren ZnO uwidaczniają się bardzo cienkie

(o grubości kilkudziesięciu nanometrów) jaśniejsze warstwy, przypuszczalnie zbudowane z fazy szklistej bogatej w ${\rm Bi}_2{\rm O}_3$.



Rys. 7. a) Obraz BSE z mikroskopu skaningowego mikrostruktury przełamu wielowarstwowego warystora; b)–c) wyniki analizy pierwiastkowej metodą EDS przeprowadzonej wzdłuż linii A i B

Właściwości elektryczne wielowarstwowych warystorów

Przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej otrzymanych wielowarstwowych warystorów przedstawiono na rys. 8. Na rys. 8a widać, że dla napięcia powyżej odpowiednio 60 V dla warystora 10-warstwowego i 80 V dla 5-warstwowego następuje gwałtowny wzrost prądu wynikający ze skokowego zmniejszenia się rezystancji warystora. Rysunek 8b ilustruje przejście od obszaru niskich napięć

i prądów, charakteryzującego się wysoką rezystancją warystora, do obszaru nieliniowej charakterystyki warystora powyżej napięcia przebicia bariery potencjału na granicach ziaren. Współczynnik nieliniowości wyznaczony z wykresu log I = f(log U) wynosi ok. 23 i 27, odpowiednio dla warystora 10- i 5-warstwowego.



Rys. 8. Charakterystyka prądowo-napięciowa warystorów wielowarstwowych

Wartości napięcia przełączania i współczynnika nieliniowości rosną ze wzrostem grubości warstwy warystorowej pomiędzy elektrodami wewnętrznymi. Wynika to ze wzrostu liczby granic międzyziarnowych w tych obszarach i jest zgodne z wynikami innych autorów.

Podsumowując, testowe wielowarstwowe warystory, wykonane w technologii LTCC na bazie domieszkowanego tlenku cynku z platynowymi elektrodami wewnętrznymi, charakteryzowały się drobnoziarnistą, zwartą mikrostrukturą, kompatybilnością z elektrodami platynowymi, wysokim współczynnikiem nieliniowości w zakresie 23 \div 27 i napięciem przełączania 60 \div 80 V.

2.3. Badania i optymalizacja parametrów polimerowych warstw grzejnych

Promieniowanie podczerwone jest źródłem ciepła stosowanym w wielu dziedzinach życia począwszy od zastosowań typowo przemysłowych po medycynę. Szczególnie podkreślany jest pozytywny wpływ tego rodzaju promieniowania na organizmy żywe. Planarne grzejniki podczerwieni, zwane również infra-panelami, są źródłem ciepła dla zwierząt stosowanym m. in. w gołębnikach, stajniach, oborach, służą również do ogrzewania pomieszczeń gospodarczych, garaży, altan itp. Często przedstawiane są jako źródła tzw. dalekiej podczerwieni FIR (*Far Infrared*). Istniejące rozwiązania charakteryzują się stosunkowo drogie, dlatego zostały podjęte próby zastosowania w nich tanich warstw polimerowych.

Przedstawiono dwa technologiczne rozwiązania polimerowych grzejników podczerwieni wykorzystujących jako elementy grzejne warstwy polimerowo-srebrowe oraz polimerowo-węglowe naniesione na elastycznym podłożu foliowym. Parametry grzejników określane były poprzez pomiary rozkładów temperatury na ich powierzchniach z użyciem kamery termowizyjnej oraz charakterystyk spektralnych z wykorzystaniem specjalnie wykonanego stanowiska pomiarowego. Stanowisko to opracował i pomiary wykonał dr hab. inż. T. Piotrowski z Zakładu Badań Materiałów i Struktur Półprzewodnikowych.

Zakresy promieniowania podczerwonego

Promieniowanie podczerwone jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali mieszczącym się w zakresie między promieniowaniem widzialnym i mikrofalowym. W zależności od temperatury emitera ciepła mieści się ono w zakresie 0,78 ÷ 1000 µm. Jest ono niewidzialne dla oka i jednocześnie stanowi część naturalnego spektrum promieniowania słonecznego. Atmosfera Ziemi pewne zakresy fal elektromagnetycznych przepuszcza, a niektóre pochłania. Te, które "przebijają się" przez nią, nazywają się "oknami atmosferycznymi". Jak pokazano na rys. 9, bardzo silnie tłumione jest szkodliwe dla organizmów żywych pro-



Rys. 9. Wykres transmitancji atmosfery ziemskiej w obszarze bliskim podczerwieni

mieniowanie UV, natomiast bardzo dobrze przepuszczalne jest promieniowanie widzialne. Jeżeli chodzi o promieniowanie podczerwone, to "okna" przeplatają się z obszarami o bardzo dużym tłumieniu, tworząc swoistą strukturę grzebieniową. Szczególnie ważne jest tzw. "wąskie okno", dzięki któremu promieniowanie podczerwone o długości fali 7 \div 14 µm (TIR) może bez przeszkód osiągnąć jej powierzchnię. Kiedy jest odpowiednio ciepło, powierzchnia Ziemi sama staje się emiterem promieniowania podczerwonego w zakresie długości fali 7 \div 14 µm i maksymalnym natężeniu uzyskiwanym dla 10 µm.

Promieniowanie podczerwone w zależności od długości fali dzieli się na trzy zakresy: bliskie NIR, średnie MIR oraz dalekie FIR. Zakresy te nie są jednoznacznie zdefiniowane. Międzynarodowa organizacja International Commission on Illumination (CIE) rekomenduje następujący podział widma promieniowania podczerwonego: IR-A: $0,7 \div 1,4 \mu m$, IR-B: $1,4 \div 3 \mu m$, IR-C: $3 \div 1000 \mu m$. Jednak bardziej rozpowszechniony jest następujący podział: bliska podczerwień (*Near-Infrared*) NIR: $0,75 \div 1,4 \mu m$, krótkofalowa podczerwień (*Short-wave Infrared*) SWIR: $1,4 \div 3 \mu m$, średnia podczerwień (*Medium-wave Infrared*) MWIR: $3 \div 8 \mu m$, długofalowa podczerwień (*Long-wave Infrared*) LWIR: $8 \div 15 \mu m$, daleka podczerwień (*Far Infrared*) FIR: $15 \div 1000 \mu m$. Suma zakresów MWIR oraz LWIR czasami nazywana jest podczerwienią termiczną TIR (Thermal Infrared). W astronomii używany jest jeszcze inny podział zakresów promieniowania, np. NIR (0,7 ÷ 1) to 5 µm, MIR 5 to (25 ÷ 40) µm, FIR (25 ÷ 40) to (200 ÷ 350) µm. Taki podział, zwłaszcza jeżeli chodzi o daleką podczerwień, jest uzasadniony występowaniem "okna" powyżej 25 µm (rys. 9), gdyż w tym zakresie wykonywane są obserwacje astronomiczne. W wielu przypadkach dolna granica FIR przesuwana jest do długości fali 4 lub 5,6 µm, a nawet 3 µm. Należy jednak traktować to raczej jako zabieg marketingowy.

Praktyczne zastosowania promieniowania dalekiej podczerwieni

Promieniowanie podczerwone jako źródło ciepła wykorzystywane jest w wielu dziedzinach życia począwszy od zastosowań typowo przemysłowych, jak np. suszenie i wypalanie warstw i lakierów poprzez systemy odladzania skrzydeł samolotowych, aż po przetwórstwo żywności, np. do suszenia warzyw i żywności. Szczególną rolę odgrywa promieniowanie podczerwone o zakresie długości fali 7 ÷ 14 µm, zaliczane przez niektóre źródła do dalekiej podczerwieni FIR, a przez inne do długofalowej LWIR lub termicznej TIR, w każdym razie pokrywające się z częścią widma promieniowania słonecznego w zakresie tzw. "waskiego okna" Charakteryzuje się ono szczególnym, pozytywnym oddziaływaniem na organizmy żywe, dzięki czemu znajduje wiele zastosowań w medycynie i fizjoterapii. Jedną z cech charakterystycznych tego promieniowania jest zdolność do ogrzewania ciał bezpośrednio w drodze konwersji, tzn. bez podgrzewania otaczajacego je powietrza. Typowym przykładem takiego oddziaływania jest syndrom turystów mogacych opalać się na nasłonecznionym stoku nawet przy ujemnych temperaturach. Ciało wystawione na działanie promieniowania słonecznego ulega bezpośredniemu i szybkiemu podgrzaniu i jest za to odpowiedzialna właśnie daleka podczerwień.

W szczególności ten typ promieniowania ma zdolność do penetracji w głąb komórek tworzących ludzkie ciało na głębokość nawet 4 ÷ 5 cm, co stanowi wielkość prawie 80-krotnie większą niż dla ciepła w ogóle. Dodatkowo wnikające promieniowanie wywołuje drgania komórek o częstotliwości przekraczającej nawet 2000 drgań na minutę, co z kolei pobudza metabolizm. W chwili gdy FIR wnika do tkanki podskórnej, energia świetlna przemienia się w energię cieplną. W głębszych warstwach ten efekt termalny powoduje rozszerzenie naczyń włosowatych, co prowadzi w efekcie do polepszenia cyrkulacji krwi oraz redukcji ilości toksyn w ciele w wyniku wytwarzania potu. Doświadczenia ze zwierzętami wykazują, że FIR poprawia rozpływ krwi w skórze i z tego względu zalecane jest stosowanie naświetlania FIR w leczeniu niedokrwienia i martwicy tkanki skórnej wywołanych obrażeniami, cukrzycą lub chorobą tętnic obwodowych. Dodatkowo niektóre badania wykazują, że naświetlanie FIR może poprawić czynność śródbłonka i zredukować częstotliwość występowania choroby układu krążenia. Terapia FIR (w zakresie długości fali powyżej 5,6 µm) jest nieinwazyjną i wygodną metodą terapeutyczną, która może poprawić niewydolność dostępu naczyniowego, zazwyczaj wyrażanego poprzez niedostateczny przepływ wejściowy Qa. Naświetlanie podczerwienią w zakresie długości fali 4 ÷ 20 µm z pikiem w zakresie 7 ÷ 12 µm może być bardzo efektywną terapią medyczną powodującą niszczenie niektórych komórek nowotworowych, które charakteryzują się niskim poziomem białek szoku termicznego HSP-70.

Infra-panele

Infra-panele są jednym z podstawowych źródeł promieniowania podczerwonego. Są to płaskie grzejniki elektryczne o stosunkowo dużych gabarytach, przystosowane przeważnie do montażu na ścianach lub sufitach. Służą do ogrzewania domów, stajni, pomieszczeń dla zwierząt, garaży, biur itp. Zalety tego typu ogrzewania są następujące:

- niskotemperaturowa emisja ciepła bez promieniowania świetlnego;
- temperatura odczuwalna jest o 2 ÷ 3°C wyższa niż rzeczywista;
- grzejniki nie wysuszają gwałtownie powietrza w pomieszczeniach, jednocześnie sukcesywnie dogrzewają i dosuszają ściany, co zapobiega to powstawaniu pleśni i grzybów;
- brak konwekcji powietrza i rozprzestrzeniania się kurzu;
- ekonomia użytkowania wysoka wydajność dzięki szybkiej reakcji, gdyż grzejnik nie potrzebuje czasu na "rozgrzanie";
- brak różnic w temperaturze między różnymi poziomami pomieszczenia, możliwość dostosowania temperatury dla każdego pomieszczenia osobno;
- łatwy i szybki montaż, brak potrzeby skomplikowanych i drogich instalacji.

Infra-panele charakteryzują się mocą znamionową $250 \div 500$ W zależnie od ich wymiarów gabarytowych i pracują pod napięciem znamionowym 230 V. Większość z nich nie jest wyposażona w termostaty, temperatura powierzchni grzania zawiera się w granicach $+70 \div 100^{\circ}$ C. Typowymi materiałami stosowanymi jako elementy grzejne są druty metalowe, tkaniny przewodzące maty z włókien węglowych itp. umieszczone pomiędzy dwiema izolacyjnymi pokrywami. Materiał tych pokryw oprócz doskonałych własności izolacyjnych musi mieć wysoką odporność na długotrwałe działanie wilgoci, a także czynników chemicznych, takich jak np. amoniak.

Podstawową wadą dostępnych na rynku infra-paneli jest ich stosunkowo wysoka cena (koszt 1 dcm² grzejnika to ok. 7 euro, co oznacza, że np. panel 300 W kosztuje netto ok. 200 euro). Szczególnie w polskich realiach rynkowych taki grzejnik jest praktycznie niesprzedawalny. Dlatego rozpoczęto poszukiwania alternatywnych rozwiązań technologicznych. Wykorzystanie stosunkowo tanich past polimerowych nadrukowywanych na tanich podłożach foliowych wydawało się być interesującą alternatywą.

Przygotowanie próbek do badań

Próbki testowe wykonano w technologii sitodruku przy użyciu past polimerowo-srebrowych (rys. 10a) i polimerowo-węglowych (rys. 10b). Pasty naniesione zostały na folię Mylar® grubości 100 µm. Każdy z elementów grzewczych umieszczono pomiędzy dwiema okładkami izolacyjnymi sklejonymi za pomocą żywicy epoksydowej (rys. 10c).



Rys.10. Elementy grzewcze: a) polimerowo-srebrowy, b) polimerowo-węglowy i przykładowy grzejnik polimerowo-węglowy z okładkami MDF (c)

Wykonano pięć rodzajów grzejników: polimerowo-srebrowy umieszczony między okładkami MDF, polimerowo-węglowy między okładkami MDF (*medium density fiberboard*), polimerowo-węglowy między okładkami HPL (*high pressure laminates*), polimerowo-węglowy między okładkami z laminatu szklano-epoksy-dowego oraz polimerowo-węglowy między okładkami wykonanymi z poliwęglanu. Z uwagi na fakt, że rezystancja na kwadrat warstw srebrowych jest dużo niższa od rezystancji na kwadrat warstw węglowych, zastosowano rozwiązanie technologiczne pozwalające otrzymać odpowiednią temperaturę powierzchni grzejnika. Polegało to na tym, że ścieżki srebrowe zostały nadrukowane w formie połączenia szeregowo-równoległego (rys. 10a). Zastosowanie past węglowych umożliwia w szerokim zakresie regulację wartości rezystancji na kwadrat poprzez dobór i połączenie past o różnej rezystancji przed procesem utwardzania. Dlatego też warstwy polimerowo-węglowe mają proste kształty (rys. 10b).

Charakterystyki wykonanych grzejników zostały określone przez pomiary rozkładu temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej Vigo V-20 oraz poprzez pomiar charakterystyk spektralnych przy użyciu specjalnego systemu pomiarowego. Wykonane modele grzejników poddano badaniom trwałości elektrycznej przy zasilaniu napięciem znamionowym 230 V. W ich wyniku za najbardziej perspektywiczną uznano wersję wykorzystująca warstwy polimerowo-węglowe umieszczone między okładkami poliwęglanowymi. Dla tej wersji zostały określone charakterystyki temperaturowe i prądowe grzejników oraz dodatkowo sprawdzono termiczne charakterystyki nagrzewania próbek wykonanych z różnych materiałów. Były one umieszczone w odległości 25 cm od grzejnika o wymiarach 48 cm × 36 cm i mocy 180 W.

Wyniki badań

Na rys. 11 przedstawiono zdjęcie termograficzne grzejnika 180 W. Jest on zbudowany z dwóch, połączonych równolegle sekcji foliowych grzejników polimerowo--weglowych o rezystancji ok. 600Ω każda, umieszczonych między dwoma płytami poliwęglanowymi grubości 3 mm każda. Płyty spojone są mechanicznie za pomocą metalowych ceowników. Jak widać, rozkłady temperatur na powierzchni są dość równomierne, a różnice temperatur nie przekraczają kilkunastu stopni. Jednym Rys. 11. Zdjęcia termograficzne powierzchni z podstawowych parametrów grzejników jest ich charakterystyka spektralna. W celu



grzejnika polimerowo-węglowego z okładzinami poliwęglanowymi 180 W

jej określenia został opracowany specjalny system pomiarowy. Porównanie promieniowania ciała czarnego BB i promieniowania zarejestrowanego dla grzejnika pozwala określić spektralną charakterystykę promieniowania grzejnika (rys. 12).



Rys. 12. Charakterystyki spektralne grzejnika polimerowo-srebrowego (a), polimerowo-węglowego (b) oraz polimerowo-węglowego (c) z okładkami poliwęglanowymi. A - element grzejny umieszczony między okładkami MDF, B - element grzejny między okładkami szklano-epoksydowymi, C - element grzejny między okładkami HPL (BB, Bb - ciało doskonale czarne)

Jak można zauważyć, przebieg charakterystyk dla obu typów grzejników jest podobny. Największe natężenie promieniowania mieści się w zakresie 6 ÷ 14 µm z wyraźnie zaznaczonym maksimum odpowiadającym długości fali 8,5 µm. W przypadku grzejnika polimerowo-węglowego zauważono znaczący wpływ rodzaju okładek na natężenie emitowanego promieniowania (rys. 12b). Okładki MDF silnie tłumią emisję promieniowania podczerwonego. Przebiegi natężenia promieniowania dla elementów grzejnych umieszczonych w okładkach szklanoepoksydowych i okładkach HPL są zbliżone do przebiegu odpowiadającego emisji promieniowania ciała doskonale czarnego. Równie dobre parametry uzyskano dla grzejnika wykonanego z poliwęglanu. Przy temperaturze 340 K natężenie promieniowania W_{340} = $\sigma^* T^4 = 0,076 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ zmierzone natężenie promieniowania wynosiło 0,060 W·cm⁻², co daje średnią emisyjność na poziomie 0,79 przy maksimum długości fali na poziomie 10 µm.

Wyniki pomiarów charakterystyk temperaturowych i prądowych grzejnika polimerowo-węglowego wykazały, że powierzchnia grzejnika osiąga temperaturę nasycenia po ok. 20 min. (rys. 13a). Ten rodzaj grzejnika charakteryzuje dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji. Jak wynika z pomiarów przedstawionych na rys. 13 jego wartość wynosi +900 ppm/K⁻¹. Uzyskanie takiej wartości wskazuje, że grzejniki są chronione przed przegrzaniem z powodu wzrostu ich rezystancji wraz z temperaturą.



Rys. 13. Charakterystyki temperaturowa (a) i prądowa (b) grzejnika polimerowo-węglowego

Na rys. 14 przedstawiono wyniki pomiarów przyrostów temperatur na powierzchniach próbek wykonanych z różnych materiałów umieszczonych w pobliżu grzejnika polimerowego. Mieszczą się one w granicach $3 \div 6$ °C. Jak widać, wszystkie charakterystyki nagrzewania mają charakter wykładniczy, a widoczne różnice temperatur nasycenia należy wiązać z różnymi poziomami parametrów nagrzewanych materiałów, jak np. z przewodnością cieplną.

Pomiary różnych wersji foliowych grzejników podczerwieni wykazały, że jest możliwe uzyskanie grzejnika emitującego promieniowanie w zakresie $7 \div 14 \mu m$. Zakres ten odpowiada raczej promieniowaniu podczerwonemu długofalowemu

LWIR, a nie dalekiemu FIR. Często jednak nawet w literaturze naukowej pod pojęciem dalekiej podczerwieni jest rozumiany zakres długości fali obejmujący przedział "wąskiego okna" promieniowania słonecznego. Przeprowadzone badania wykazały, że wykonane grzejniki polimerowe maja zdolność do ogrzewania w drodze konwersji umieszczonych w ich sąsiedztwie próbek wykonanych z różnych materiałów. Zaobserwowano wzrost temperatury powierzchni tych próbek Rys. 14. Zależność zmiany temperatury pow zakresie $3 \div 6^{\circ}$ C.

Badania eksperymentalne wykazały również, że przy produkcji tego typu



wierzchni różnych próbek od czasu ich nagrzewania przy użyciu źródeł promieniowania podczerwieni

grzejników kluczowe znaczenie ma dobór odpowiedniego rodzaju okładek izolujących, gdyż element ten znacząco wpływa na emisję promieniowania. Na obecnym etapie realizacji projektu jako optymalne wytypowano okładki wykonane z tworzywa poliweglanowego. Foliowe grzejniki polimerowe wydają się być efektywnym i relatywnie tanim źródłem promieniowania podczerwonego, aczkolwiek rozwiniecie tej technologii wymaga dodatkowych prób i testów, w tym badań długotrwałych.

2.4. Wytwarzanie precyzyjnych warstw przewodzących metodą ablacji laserowej

Z uwagi na charakterystykę technologii LTCC interesujące jest także zastosowanie obróbki laserowej w stosunku do niewypalonych warstw LTCC (po wydruku), co umożliwia precyzyjne wytwarzanie elementów zagrzebanych. Stwierdzono jednak, że dokładność wykonania wytworzonych elementów jest znacznie niższa niż w przypadku obróbki warstw uprzednio wypalonych (na poziomie ok. 20 µm).

W standardowym procesie LTCC jednym z czynników limitujących precyzję wykonywanych struktur jest rozdzielczość sitodruku. Obecnie na linii technologicznej LTCC w Oddziale ITE w Krakowie możliwe jest wykonanie technika sitodruku ścieżek przewodzących o minimalnej szerokości 125 µm i minimalnym odstępie między ścieżkami 125 µm. Nierówność wydrukowanej krawędzi ścieżki wynosi ok. 20 µm.

Zaproponowano alternatywną metodę wykonywania ścieżek przewodzacych poprzez zastosowanie sterowanej numerycznie obrabiarki laserowej do selektywnego usuwania nadrukowanej warstwy przewodzącej. W metodzie tej na podłoże najpierw nanosi się jednolite pole materiału przewodzącego. Następnie, poprzez prowadzenie lasera wzdłuż wzoru złożonego z równoległych linii, usuwa się większość materiału przewodzącego pozostawiając go jedynie w obszarze wykonywanego wzoru. Przeprowadzone badania wskazują, że jest możliwe kształtowanie w ten sposób struktur przewodzących metodą ablacji laserowej – obszar poddany obróbce laserowej traci zdolność przewodzenia prądu. Ponieważ wzór wykonywany jest za pomocą obrabiarki sterowanej numerycznie, wyeliminowany zostaje czasochłonny etap fotochemicznego przygotowania masek oraz sit do druku. Wszystkie wzory są wykonywane za pomocą jednego sita zawierającego pola kontaktowe o standardowych wymiarach. Co więcej, folie z nadrukowanymi polami przewodzącymi mogą być wykonane zbiorczo, przechowywane i następnie wykorzystywane do wykonywania różnych wzorów w miarę potrzeb.

Obróbka laserowa może być wykonywana na foliach niewypalonych (przed wypałem) lub też na wypalonej strukturze. W tym drugim przypadku możliwe jest kształtowanie warstwy przewodzącej jedynie na zewnętrznych warstwach struktury.

Zmodyfikowany proces przebiega następująco:

- cięcie arkuszy folii oraz wykonywanie otworów dla połączeń międzywarstwowych (via);
- druk obszarów przewodzących;
- obróbka laserowa wycinanie ścieżek;
- obróbka laserowa wycinanie otworów;
- wypełnianie otworów;
- składanie folii w stos i laminacja;
- wypał;
- obróbka laserowa wycinanie ścieżek.

Opracowanie skutecznej metody wytwarzania ścieżek przewodzących opisywaną metodą wymaga znalezienia odpowiedzi na kilka pytań. Pierwszym zadaniem jest zbadanie własności fizycznych i chemicznych powierzchni ceramiki LTCC poddanej obróbce laserowej. W szczególności interesuje nas odpowiedź na pytanie o skuteczność usuwania przewodnika oraz czy obróbka laserowa powinna być realizowana na etapie folii niewypalonych, czy też dopiero po wypale. Drugie zagadnienie dotyczy optymalnych warunków pracy lasera przy wytwarzaniu wzoru. Obecnie wytworzenie jednego wzoru przewodzącego z pola pasty srebrowej o wymiarach 15 mm × 15 mm wymaga ok. jednej godziny pracy urządzenia. Można jednak z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że lepszy dobór parametrów pracy lasera (moc wyjściowa p, częstotliwość impulsów f, prędkość przesuwu v) powinien pozwolić na zwiększenie wydajności obróbki, w tym przyspieszenie procesu.

Wykonano badania porównawcze SEM i EDS ceramiki nieobrobionej, ceramiki obrobionej laserowo przed wypałem (*pre-firing*) oraz ceramiki obrobionej laserowo po wypale (*post-firing*). Strukturę testową wykonano na podłożu Heraeus CT700. Na folii LTCC naniesiono sitodrukiem warstwę srebrnej pasty przewo-

dzącej DuPont 6142D. Urządzenie laserowe wyposażone w impulsowy laser Nd:YAG o długości fali wyjściowej 355 nm zostało użyte z parametrami obróbki laserowej p = 3%, f = 10 kHz, v = 30 mm/s. Następnie dokonano wypału struktury. Próbę usunięcia materiału powtórzono na wypalonej strukturze przy tych samych parametrach obróbki. Skład chemiczny określono metodą badań EDS w Zakładzie Badań Materiałów i Struktur Półprzewodnikowych.

Pierwszą obserwacją było stwierdzenie obecności węgla w badanej próbce, która świadczy o nieprawidłowym procesie wypału ceramiki oraz o konieczności poprawy procesu. Prawdopodobnie jest to spowodowane stosowaniem pieca komorowego, w którym proces wypału następuje bez dostępu powietrza, a co za tym idzie – do próbki nie jest dostarczana wystarczająca ilość tlenu do spalenia całego materiału organicznego. Obróbka laserowa powierzchni wykonana po wypale skutkuje ok. 3-krotnym wzrostem zawartości węgla na powierzchni, co oznacza, że węgiel – z uwagi na wysoką temperaturę sublimacji (3915°C) – nie jest usuwany przez akcję laserową.

Porównania skuteczności obróbki dokonano na podstawie zestawienia zawartości srebra na powierzchni próbki przed wypałem i po wypale. Nadrukowana pasta zawiera po wypale wagowo 57% srebra. Próba usunięcia laserem wypalonej warstwy skutkuje powstaniem warstwy zawierającej wagowo 24% srebra. Znacznie lepsze jest zatem usuwanie srebra przed wypałem, ponieważ w takim przypadku w strukturze pozostaje jedynie ok. 1,5% srebra. Dlatego dalsze prace skoncentrowano na pierwszej metodzie.

Na rys. 15 przedstawiono wygląd struktury po otrzymaniu ścieżek. Jak widać, obrabiana laserowo (zarówno przed wypałem, jak i po wypale) powierzchnia ceramiki LTCC będzie miała poziome rowki odpowiadające kierunkowi przesuwu wiązki laserowej. Zjawisko to jest wywołane poziomym rozkładem mocy wiązki laserowej – jest ona największa w geometrycznym centrum wiązki.



Rys. 15. Nierówności powierzchni: a) zdjęcie SEM (kontrast topograficzny) obszaru przewodnika obrabianego po wypale; b) ścieżki przewodzące (białe) wykonane metodą ablacji laserowej przed wypałem (zdjęcie z profilometru optycznego). W wybranym obszarze (kolor niebieski) widoczne są poziome rowki odpowiadające kierunkowi przesuwania wiązki lasera.

Przeprowadzono serię prób cięcia niewypalonej folii LTCC z nadrukowaną warstwą przewodzącą i bez warstwy przy różnych parametrach pracy obrabiarki laserowej. Następnie stworzono model matematyczny łączący parametry pracy

lasera z uzyskaną głębokością cięcia. Model ten pozwala na teoretyczny dobór optymalnych nastaw urządzenia dla uzyskania pożądanego rezultatu.

Doświadczenia wykonano na niewypalonych strukturach złożonych z dwunastu zlaminowanych warstw folii LTCC DP951 PT. Na każdej strukturze wykonano serię pojedynczych nacięć laserem (jedno przejście), przy różnych parametrach pracy. Analogiczne doświadczenie przeprowadzono dla struktur z naniesioną techniką sitodruku warstwą srebrnej pasty przewodzącej DP6142D grubości 20 µm.

Analiza otrzymanych wyników wykazała, że przez odpowiedni dobór parametrów pracy lasera możliwe jest zarówno efektywne przecinanie, jak i wybieranie powierzchni ceramiki LTCC, przy czym zależność głębokości cięcia od parametrów wejściowych ma charakter nieliniowy.

Próby przeprowadzone dla powierzchni z naniesioną warstwą srebrną wykazały, że dobór parametrów pracy w taki sposób, aby usunąć jedynie warstwę przewodnika z powierzchni bez naruszania materiału podłożowego, jest praktycznie niemożliwy. Można jednak ograniczyć zniszczenia do głębokości ok. 130 µm i wykonywać precyzyjne cięcia materiału charakteryzujące się praktycznie pionowymi ściankami. Należy podkreślić, że materiał podłożowy z naniesioną warstwą przewodnika zachowuje się inaczej niż materiał bez warstwy srebra (rys. 16). Przedstawiono wyniki modelowania dla struktur z warstwą srebra na górnej powierzchni. Wzory ogólne dają się przenosić i analogiczne rozumowanie można przeprowadzić dla struktur bez tej warstwy. Różnica będzie się przejawiać w parametrach modelu, a tym samym w błędach przybliżeń.



Rys. 16. Porównanie przekroju materiału bez warstwy przewodzącej (a) i z warstwą przewodzącą (b) dla tych samych parametrów obróbki: f = 20 kHz, v = 20 mm/s, p = 75%. Należy zwrócić uwagę na różny kształt wyciętego rowka.

Dobór optymalnych parametrów wybierania materiału jest skomplikowanym zagadnieniem z uwagi na wielość możliwych rozwiązań. Z matematycznego punktu widzenia można rozważać funkcję d(p,f,v) reprezentującą głębokość ablacji danego materiału w zależności od nastaw urządzenia (rys. 17). Istnienie trzech niezależnych parametrów wejściowych, tj. parametrów pracy lasera (prędkość przesuwu v, częstotliwość pracy f, moc p), oznacza konieczność przeszukania

trójwymiarowej przestrzeni rozwiązań. Sprawdzenie dla każdego z parametrów niezależnych dziesięciu różnych wartości oznacza konieczność wykonania w sumie $10^3 = 1000$ prób. Zdecydowano się zatem na przeprowadzenie doświadczenia dla wartości parametrów wejściowych tworzących siatkę o rozmiarach 4×4×4, co daje 64 pomiary. Siatka ta jest następnie uzupełniana drugą siatką wartości parametrów 4×4×4, dobraną tak, aby w trójwymiarowej przestrzeni parametrów wejściowych punkty (*p*,*f*,*v*) siatki uzupełniającej leżały pomiędzy punktami (*p*,*f*,*v*) siatki głównej. Oznaczało to w sumie konieczność wykonania 2×64 = 128 prób ablacji.



Rys. 17. Głębokość ablacji w zależności od parametrów p i f dla różnych wartości v. Wykreślone powierzchnie odpowiadają następującym wartościom v, patrząc od góry wykresu v = 5, 10, 15, 20 mm/s. Aproksymacja funkcjami sklejanymi i siatką o gęstości 40 punktów.

Pierwszym krokiem był wybór metody modelowania, do którego wystarczyłby posiadany format danych wejściowych. Do aproksymacji wykorzystano siatkę pełnych wartości, podczas gdy druga posłużyła do obliczania błędów na różnych etapach modelowania. Aby ominąć problem nadmiernego dopasowania, dobór parametrów modelu odbywa się na zbiorze walidacyjnym, a następnie błąd całościowy liczony jest na zbiorze testowym i nie jest brany w procesie uczenia się modelu. Dwa ostatnie zbiory tworzą razem drugą siatkę danych, przy czym zbiór testowy jest mniejszy i dobrany tak, aby nie wykazywać skupienia w jednym miejscu dziedziny.

Przeanalizowano wszystkie możliwe funkcje głębokości przy ustalonych dwóch zmiennych. Tak powstałe funkcje pokazały prawie eksponencjalną zależność głębokości od prędkości. Zdecydowano się zatem na model, który można opisać równaniem:

$$d(p, f, v) = \exp\left(\prod_{i \in I} S_i(p, f) \cdot v^i\right),\tag{1}$$

gdzie S_i jest pewną funkcją dwóch zmiennych p i f, a I trójelementowym podzbiorem liczb naturalnych, do którego należy zero. Analiza statystyczna pokazała, że można ograniczyć rozważania do zbiorów potęg $\{2,1,0\}$ oraz $\{1,0,-1\}$.

Można oczekiwać, że zarówno rosnąca moc, jak i malejąca prędkość spowodują wzrost głębokości. Ponieważ dane doświadczalne nie wykazują tego typu zależności

w niektórych obszarach dziedziny, wzięto pod uwagę pomijanie na etapie aproksymacji i walidacji niektórych brzegowych wartości zmiennych. Dzieje się to jednak tylko w przypadku, gdy taki zabieg powoduje zmniejszenie błędu. Taką operację można wykonać bez szkody dla zastosowania modelu w późniejszych celach.

Analiza kształtu powierzchni S_i pokazała, że ze względu na ich podobieństwo można je opisywać tym samym typem równania:

$$S(p,f) = \alpha(p) \cdot \prod_{j=1}^{3} (f - \beta_j(p)) + c,$$
 (2)

gdzie α jest wielomianem stopnia 1 lub 2, β_i (i = 1,2,3) jest wielomianem stopnia 2 lub 3, a c jest stała. Równanie (2) wynika z dwukrotnego zastosowania aproksymacji jednowymiarowej, za pierwszym razem przy ustalonym *p*, a następnie przy ustalonym f. Pomiędzy nimi wykorzystuje się zamianę postaci ogólnej wielomianu na iloczynowa. Stała c poczatkowo służyła jedynie do zapewnienia, że odpowiednie wielomiany stopnia trzeciego mają dokładnie trzy pierwiastki rzeczywiste. W trakcie obliczeń okazało się jednak, że błędy numeryczne mogą powodować, iż nie jest spełnione Zasadnicze Twierdzenie Algebry i wielomiany te mogą mieć w niektórych przypadkach cztery pierwiastki, co jest niemożliwe z matematycznego punktu widzenia. Stała c pozwala także omijać takie właśnie sytuacje. Ponieważ model ma służyć nie tyle do przewidywania wartości funkcji, lecz do takiego doboru argumentów, aby uzyskać zadaną z góry wartość funkcji, więc do obliczania błędów zastosowano ważony błąd względny. Pozwala to na teoretycznie lepsze dopasowanie w interesujących nas obszarach dziedziny, np. dla większych prędkości. W testach zastosowano wagi równe wartościom predkości, ale można je uzależniać od wszystkich trzech argumentów dziedziny.

Otrzymany w ten sposób model wykazuje błąd 24,12% na zbiorze walidacyjnym i 29,55% na zbiorze testowym, pomijając przy tym dane dla p = 100% i tym samym nie dopasowując się do punktów, dla których p = 87,5%. Współczynnik korelacji Pearsona dla wartości eksperymentalnych i teoretycznych na zbiorze



Rys. 18. Względne błędy przybliżenia w otrzymanym modelu. Kolor zielony – błąd poniżej 12,5%, niebieski – poniżej 25%, czerwony – powyżej 25%

testowym wyniósł 0,98.

Na rys. 18 przedstawiono graficznie błędy modelu otrzymane na drugiej siatce danych. Ponieważ model pomija dane dla maksymalnej wartości zmiennej p i przyjmuje małe wagi dla małych wartości v, pojawiają się tam większe błędy. Można zauważyć, że model rzeczywiście bierze pod uwagę nasze preferencje co do wyboru obszarów dziedziny i lepiej się w nich dopasowuje (kosztem błędów w pozostałych punktach).

Rysunek 19a pokazuje punkty w przestrzeni trójwymiarowej (p, f, v) jednego z modeli odpowiadające ustalonej głębokości ablacji $d = 200 \ \mu\text{m}$. Należy zauważyć, że daną głębokość ablacji można uzyskać przy różnych nastawach parametrów pracy urządzenia. Zastosowanie modelowania matematycznego pozwala zatem na teoretyczne znalezienie przybliżonych parametrów pracy urządzenia dla uzyskania żądanej głębokości ablacji. Z praktycznego punktu widzenia najbardziej interesujące jest zwiększenie wydajności obróbki, co odpowiada maksymalnej możliwej wartości v. Na rys. 19b przedstawiono wykres możliwych wartości par (p, f, v) odpowiadających głębokości ablacji $d = 200\pm10 \ \mu\text{m}$ przy prędkości przesuwu v z zakresu 19,5 ÷ 20 mm/s.



Rys. 19. Przykładowa predykcja parametrów ablacji laserowej, dla których uzyska się zadaną wartość głębokości: a) przekrój (włókno) funkcji powstałej w wyniku modelowania dla wartości d z zakresu 200±10 µm, b) możliwe wartości (p,v) skutkujące teoretyczną głębokością ablacji d = 200±10 µm przy prędkości przesuwu z zakresu 19,5 ÷ 20 mm/s

Standardowa metoda aproksymacji funkcjami sklejanymi daje co prawda mniejszy średni błąd kwadratowy na zbiorze testowym ($err_{spline} = 24\%$ w porównaniu do $err_{test} = 29,5\%$) i trudno jest osiągnąć podobny rezultat, jednak jest to metoda sztywna i nie daje się dopasowywać do potrzeb. Dobrym pomysłem jest więc branie przecięć włókien pochodzących od obu metod (standardowej i otrzymanej w procesie modelowania). Równocześnie proces doboru właściwego modelu można dalej udoskonalać, np. poprzez zastosowanie kroswalidacji lub innych funkcji wykorzystywanych na różnych etapach modelowania.

2.5. Modele, prototypy i wdrożenia

Modele

- Folia warystorowa W1-AP1
- Folia katodowa K-4
- Folia katodowa K-6
- Folia grafitowa G1-ACD
- Sterowany mikroprocesorem zasilacz awaryjny MSZ-03

Prototypy - generator pola magnetycznego

Wdrożenia - technologia wykonywania rezystorów hybrydowych RH

3. Współpraca międzynarodowa

W ramach Programu Eureka **E!4570- IPCTECH** kontynuowany jest projekt "Nowa generacja trójwymiarowych zintegrowanych elementów biernych i mikrosystemów technologii LTCC".

Zakład aktywnie uczestniczy w działalności Stowarzyszenia Elektroniki Organicznej (OEA). Pracownicy Zakładu biorą udział w kwartalnych spotkaniach Stowarzyszenia oraz w pracach grup roboczych ds. hermetyzacji organicznych elementów półprzewodnikowych i opracowywania demonstratora wykorzystującego elementy organicznej elektroniki drukowanej.

Przygotowany został nowy projekt SENSEIVER "Low-Cost and Energy-Efficient LTCC Sensor/IR-UWB Transceiver Solutions for Sustainable Healthy Environment" koordynowany przez Uniwersytet w Nowym Sadzie (Serbia) w ramach programu UE Maria Curie. Uczestniczą w nim partnerzy z Serbii, Austrii, Portugalii, Niemiec, Rumunii i Polski. Realizacja projektu rozpoczęła się 1 grudnia 2011 r.

4. Działalność edukacyjna

Pracownicy naukowi Zakładu prowadzą dla studentów Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) w Krakowie zajęcia laboratoryjne w zakresie technologii warstw grubych, technologii montażu powierzchniowego, systemów fotowoltaicznych, technologii LTCC. Dla studentów AGH, Politechniki Wrocławskiej, Śląskiej, Krakowskiej i Warszawskiej były prowadzone praktyki wakacyjne oraz praktyki dyplomowe. Konsultowano i prowadzono prace dyplomowe magisterskie w zakresie technologii grubowarstwowej, techniki montażu powierzchniowego, fotowoltaiki i oświetlenia LED.

Publikacje 2011

[P1] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., CIEŻ M., GROEGER B., RYDOSZ A.: Development of Technology for Manufacturing of Buried Channels in LTCC Structures. Proc. of the 12th Conf. of the Europ. Ceram. Soc. Sztokholm, Szwecja, 19–23.06.2011, s. 1–4.

[P2] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., RYDOSZ A., MAZIARZ W., MALECHA K.: Laser Micromachined LTCC Gas Sensors. *Elektronika* 2011 vol. LI nr 3 s. 90–92.

[P3] BOCHENEK D., GUZDEK P.: Ferroelectric and Magnetic Properties of Ferromagnetic PFN Type Ceramics. J. of Magnet. a. Magn. Mater. 2011 vol. 323 s. 369–374.

[P4] CIEŻ M., PORADA Z.: Thick-Film Electroluminescent AND-Type Optoelectronic Logical Gate. Proc. of the LOPE-C 2011 Techn. & Sci. Conf. Frankfurt n. Menem, Niemcy, 28–30,06.2011, s. 222–224.

[P5] CZERWIŃSKI A., SKWAREK A., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., WITEK K.: Tin Pest and Tin Oxidation on Tin- Rich Lead Free Alloys Investigated by Electron Microscopy Methods. *Solid St. Phenom.* (złoż. do red.).

[P6] DZIADAK B., MAKOWSKI Ł., KALICKI A., MICHALSKI A., STAROSZCZYK Z., MACHNIK M., CIEŻ M., ZARASKA K., GRZESIAK W., MOLENDA J., WIEJAK J.: Wykorzystanie systemów terytorialnie rozproszonych do monitoringu jakości wód powierzchniowych. *Probl. Ekspl.* 2011 nr 3 s. 139–156.

[P7] FILIPOWSKI W., WACZYŃSKI K., WRÓBEL E., SKWAREK A., DRABCZYK K.: Efektywne wartości współczynnika dyfuzji dla modelu domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej ogniwa słonecznego. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 4 s. 57–59.

[P8] FILIPOWSKI W., SKWAREK A., WACZYŃSKI K., WRÓBEL E., DRABCZYK K.: Porównanie skuteczności procedury mycia podłoży krzemowych po procesie domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej ogniwa fotowoltaicznego dla różnych rodzajów źródła domieszki fosforowej. Mat. konf. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica, 12–15.05.2011 (złoż. do red.).

[P9] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., PIEKARSKI J.: Application of Dedicated Integrated Circuits in MPPT Systems. Proc. of the 35th Int. Conf. of IMAPS - CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011, s. 125–128.

[P10] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Sposób zagospodarowania uszkodzonych mechanicznie krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Elektronika 2011 vol. LII nr 4 s. 42–45.

[P11] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Sposób zagospodarowania uszkodzonych mechanicznie krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Mat. konf. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica, 12–15.05.2011, s. 154–160.

[P12] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., ŻUPNIK M., WOJCIECHOWSKA R., KOŁTON A., KURPASKA S.: Nowoczesne systemy doświetlania roślin oparte o najnowsze osiągnięcia technologii SSL i LED. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 6 s. 136–138.

[P13] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., MOLENDA J.: Modelowanie i monitorowanie autonomicznych instalacji fotowoltaicznych dla potrzeb mobilnych stacji pomiarowych. *Prz. Elektrotech.* 2011 nr 9a s. 172–175.

[P14] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., MOLENDA J.: Modelowanie i monitorowanie autonomicznych instalacji fotowoltaicznych dla potrzeb mobilnych stacji pomiarowych. Mat. konf. "Metrologia wspomagana komputerowo". Waplewo, 24–27.05.2011, CD, s. 1–4.

[P15] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Autonomiczne hybrydowe systemy fotowoltaiczne wspomagane ogniwami paliwowymi. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 4 s. 34–38.

[P16] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Autonomiczne hybrydowe systemy fotowoltaiczne wspomagane ogniwami paliwowymi. Mat. konf. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica, 12–15.05.2011, s. 227–234.

[P17] GRZESIAK W., MAJ T., CIEŚLIŃSKI P.: Programowalny rezystor laboratoryjny. *Prz. Elektrotech*. 2011 vol. 87 nr 10 s. 95–97.

[P18] GRZESIAK W., MAJ T., CIEŚLIŃSKI P.: Programowalny rezystor laboratoryjny. Mat. konf. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, Poland, 5–9.06.2011, CD, s. 82–87.

[P19] GRZESIAK W., ŻUPNIK M., PORADA Z.: Zastosowanie technologii SSL i LED w systemach oświetleniowych dla potrzeb muzeów i galerii sztuki. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 7 s. 190–192.

[P20] GUZDEK P., PSZCZOŁA J., CHMIST J., STOCH P.: Electrical Properties and Spin Fluctuations Studies of Y(Co_{1-x}Ni_x) Compounds. *J. of Magnet. a. Magn. Mater.* 2011 vol. 323 s. 427–431.

[P21] GUZDEK P., SIKORA M., GÓRA Ł., KAPUSTA C.: Efekt magnetoelektryczny w warstwowym kompozycie Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe₂O₄-PbFe_{0.5}Nb_{0,5}O₃. Prace XXXIX Szkoły Inżynierii Materiałowej, Krynica, 27–30.09.2011, s. 519–522.

[P22] GUZDEK P., SIKORA M., KAPUSTA C., GÓRA Ł.: Magnetic and Magnetoelectric Properties of Nickel Ferrite – Lead Iron Niobate Relaxor Composites. *J. Europ. Ceram. Soc.* (złoż. do red.).

[P23] JAKUBOWSKA M., KULAWIK J., STADLER A. W.: Rozdział III. Technologia grubowarstwowa wybrane zagadnienia. [W] Wybrane zagadnienia współczesnej elektroniki. Praca zbior. pod red. W. Janke. Politechnika Koszalińska, Koszalin 2011, s. 67–98.

[P24] JAROSZ A., WĄSOWSKI J., ZARASKA K.: CMOS Circuit for Detection of Neural Impulses. Proc. of the 18th Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Gliwice, 16–18.06.2011, s. 44–47.

[P25] KLIMIEC E., STOBIERSKI L., NOWAK S., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Electric Properties of Monophase Polycrystalline Sinters SiC, B₄C, TiC and Their Composites as Non-Inductive Volume Resistors. *J. of Electrocer.* 2011 vol. 26 nr 1–4 s. 90–98.

[P26] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Badanie właściwości piezoelektrycznych folii z politetraftalanu etylenu PET pod kątem jej zastosowania na sensory ściskania i rozciągania. *Prz. Elektrotech.* 2011 vol. 87 nr 10 s. 68–71.

[P27] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI SZ.: Badania właściwości piezoelektrycznych folii z politetraftalanu etylenu PET pod kątem jej zastosowania na sensory ściskania i rozciągania. Mat. konf. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica, 12–15.05.2011, s. 22–27.

[P28] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Wpływ kierunku mechanicznego odkształcenia folii PVDF na wartość sygnału elektrycznego. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 10 s. 72–75.

[P29] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Wpływ kierunku mechanicznego odkształcenia folii PVDF na wartość sygnału elektrycznego. Mat. konf. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011, CD, s. 495–500.

[P30] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Dynamic Research of Foot Pressure Distribution – the Four-Points Shoe Insert with PVDF Sensors. Proc. of the 35th Int. Conf. of IMAPS - CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011, s. 247–251.

[P31] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Dynamic Research of Foot Pressure Distribution – the Four-Points Shoe Insert with PVDF Sensors. *Elektronika* (złoż. do red.).

[P32] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI SZ., MACHNIK M.: The Investigation of Electret Film Durability in Polyethylene Terephtalate (PET) from a Certain Angle of Their Application as Pressure Sensors. *Mechanical and Aerospace Engineering* [w serii: Applied Mechanics a. Materials: t. 110–116] Trans Tech Publ., 2011, s. 1252–1258.

[P33] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI SZ., MACHNIK M.: The Investigation of Electret Film Durability in Polyethylene Terephthalate (PET) from a Certain Angle of Their Application as Pressure Sensors. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical, Industrial and Manufacturing Technologies. Singapur, 26–28.02.2011, 2011, s. 496–500.

[P34] KLIMIEC E., ZARASKA W., PIEKARSKI J.: Research on Foot Pressure Distribution in Dynamic Conditions – Diagnostic of Flat Feet. Proc. of the Special Forum & Exhib. on Best of East – for Eastern Partnership. Warszawa, 28–30.11.2011(złoż. do red.).

[P35] KLIMIEC E., ZARASKA K., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Micropower Generators and Sensors Based on Piezoelectric Polypropylene PP and Polyvinylidene Fluoride PVDS Films – Energy Harvesting from Walking. Mechanical and Aerospace Engineering [w serii: Applied Mechanics a. Materials t. 110–116] Trans Tech Publ., 2011, s. 1245–1251.

[P36] KLIMIEC E., ZARASKA K., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Micropower Generators and Sensors Based on Piezoelectric Polypropylene PP and Polyvinylidene Fluoride Films – Energy Harvesting

from Walking. Proc. of the 2nd Int. Conf. on Mechanical, Industrial and Manufacturing Technologies. Singapur, 26–28.02.2011, s. 501–504.

[P37] KOŁODZIEJSKI J. F., SZCZĘSNY J., GUZDEK P.: Elektronika w pojazdach samochodowych. Część 1. Charakterystyczne narażenia eksploatacyjne. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 4 s. 131.

[P38] KOŁODZIEJSKI J. F., SZCZĘSNY J., GUZDEK P.: Elektronika w pojazdach samochodowych. Część 2. Magistrale komunikacyjne, podzespoły półprzewodnikowe. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 5 s. 151–157.

[P39] KOŁODZIEJSKI J. F., SZCZĘSNY J., GUZDEK P.: Elektronika w pojazdach samochodowych. Część 3. Jak uzyskać dużą niezawodność. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 6 s. 146–153.

[P40] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D.: Fabrication and Properties of Multilayer Capacitors with Multicomponent Ferroelectric Dielectric. Proc. of the 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011, s. 277–280.

[P41] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GROEGER B.: Wielowarstwowe kondensatory z dielektrykiem Bi_{1/2}Cu_{1/2}(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O₃ wytwarzane technologią LTCC. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 9 s. 164–167.

[P42] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GROEGER B.: Wielowarstwowe kondensatory z dielektrykiem $Bi_{1/2}Cu_{1/2}(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ wytwarzane technologią LTCC. Mat. konf. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011, CD, s. 76–81.

[P43] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GUZDEK P.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Lead Iron Tungstate Composites. *Acta Phys. Pol.* A (złoż. do red.).

[P44] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GUZDEK P.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Lead Iron Tungstate Composites. Proc. of the 35th Int. Conf. of IMAPS - CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011, s. 281–284.

[P45] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GUZDEK P.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Lead Iron Tungstate Composites. Proc. of the Advances in Applied Physics a. Materials Science Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (złoż. do red.).

[P46] ŁUKASIK A., SIBIŃSKI M., WALCZAK S.: Relaxation of Stresses in Polystyrene-Carbon Microcomposite Resistive Layers. Proc. of the Int. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011 (złoż. do red.).

[P47] MAKOWSKI Ł., ZARASKA K.: Przystosowanie i wykorzystanie interpretera języka Python w pomiarowym systemie wbudowanym. *Prz. Elektrotech.* 2011 vol. 87 nr 9a s. 112–115.

[P48] MAKOWSKI Ł., ZARASKA K.: Przystosowanie i wykorzystanie interpretera języka Python w pomiarowym systemie wbudowanym. Mat. konf. "Metrologia wspomagana komputerowo". Waplewo, 24–27.05.2011, CD, s. 1–4.

[P49] MROCZKOWSKI M., CIEŻ M., KALENIK J.: Studies of Rejuvenation of Electroluminescent Thick Film Structures. *Opt. Appl.* 2011 vol. XLI nr 2 s. 481–486.

[P50] MROCZKOWSKI M., CIEŻ M., KALENIK J.: Investigation of Multiple Degradation and Rejuvenation Cycles of Electroluminescent Thick Film Structures. Proc. of the 35th Int. Conf. of IMAPS - CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011, s. 161–163.

[P51] SKWAREK A., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., WITEK K.: Influence of Substrate Type on Tin Whisker Growth for Tin-Rich Lead-Free Solder Alloys. Proc. of the Int. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011, s. 132–137.

[P52] SKWAREK A., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., WITEK K.: Influence of Substrate Type on Tin Whisker Growth in Tin-Rich Lead-Free Solder Alloys. *Mater. Sci. a. Eng.* (złoż. do red.).

[P53] SKWAREK A., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., CZERWIŃSKI A., WITEK K., SZWAGIERCZAK D.: Analysis of Tin Whisker Growth on Lead-Free Alloys with Ni Presence under Thermal Shock Stress. *Mater. Sci. a. Eng.* B 2011 vol. 176 s. 352–357.

[P54] SKWAREK A., ŚRODA M., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., WITEK K.: Occurence of Tin Pest on the Surface of Tin-Rich Lead-Free Alloys. *Solder. a. Surf. Mount Technol.* 2011 vol. 23 nr 3 s. 184–190.

[P55] SKWAREK A., WITEK K.: Lutowanie kondensacyjne – wybrane aspekty. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 10 s. 65–68.

[P56] SKWAREK A., WITEK K.: Lutowanie kondensacyjne – wybrane aspekty. Mat. konf. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011, CD, s. 40–45.

[P57] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of _{0.7}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-_{0.3}Pb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O₃ Multiferroic. *Acta Phys. Pol.* A 2011 vol. 119 nr 1 s. 56–58.

[P58] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J., ZACHARIASZ P., ZIELIŃSKI P.: Magnetic and Electrical Properties of _{0.7}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-_{0.3}Pb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O₃ Multiferroic. Advances and Applications in Electroceramics [w serii: Ceramic Transactions t. 226] Wiley, 2011, s. 231–240.

[P59] STOCH P., STOCH A., KULAWIK J., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.3}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3^{-}0.7}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. *Americ. Inst. of Phys.* (złoż. do red.).

[P60] STOCH P., STOCH A., KULAWIK J., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of _{0,1}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO₃-_{0,9}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ Multiferroic. *Mater. Sci. a. Eng.* A 2011 vol. 18 s. 092062.

[P61] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., MAURIN J., ZIELIŃSKI P.: Właściwości magnetoelektryczne związku _{0.5}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-0.5Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃. *Mat. Ceram.* (złoż. do red.).

[P62] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of _{0,1}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO₃-_{0,9}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ Multiferroic. *Mater. Sci. a. Eng.* A 2011 vol. 18 s. 092063.

[P63] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of _{0.3}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-_{0.7}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ Multiferroic. *Americ. Inst. of Phys.* (złoż. do red.).

[P64] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of _{0.3}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-_{0.7}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ Multiferroic. *Acta Phys. Pol.* A. (złoż. do red.).

[P65] STOCH A., ZACHARIASZ P., STOCH P., KULAWIK J., MAURIN J.: Structural and Mössbauer Effect Studies of _{0.5}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO₃-0.5Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ Multiferroic. *Acta Phys. Pol.* A 2011 vol. 119 nr 1 s. 59–61.

[P66] SZWAGIERCZAK D.: Właściwości dielektryczne nieferroelektrycznej ceramiki Gd_{2/3}CuTa₄O₁₂ na kondensatory typu IBLC. *Elektronika* 2011 vol. LII nr 10 s. 68–71.

[P67] SZWAGIERCZAK D.: Właściwości dielektryczne nieferroelektrycznej ceramiki Gd_{2/3}CuTa₄O₁₂ na kondensatory typu IBLC. Mat. konf. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011, CD, s. 88–93.

[P68] SZWAGIERCZAK D.: Wytwarzanie i właściwości nieferroelektrycznych materiałów perowskitowych o bardzo wysokiej przenikalności elektrycznej. [w serii: Biblioteka Elektroniki: t. 33] ITE, Warszawa, 2011, ss. 137.

[P69] SZWAGIERCZAK D.: Internal Barrier Layer Capacitance Effects in Neodymium Copper Tantalate Ceramics. *Acta Phys. Pol.* A (złoż. do red.).

[P70 SZWAGIERCZAK D.: Internal Barrier Layer Capacitance Effects in Neodymium Copper Tantalate Ceramics. Proc. of the Advances in Applied Physics a. Materials Science Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (złoż. do red.).

[P71] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Application of High Permittivity Bismuth Copper Titanate in Multilayer Capacitors. *Acta Phys. Pol.* A (złoż. do red.).

[P72] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Application of High Permittivity Bismuth Copper Titanate in Multilayer Capacitors. Proc. of the Advances in Applied Physics a. Materials Science Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (złoż. do red.).

[P73] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GUZDEK P., GROEGER B.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Relaxor Composite Prepared by Tape Casting. Proc. of the Eureka-IPCTECH Kick-Off Meet. 2011, s. 51–56.

[P74] WITEK K., PIOTROWSKI T., SKWAREK A.: Analysis of Polymer Foil Heaters as Infrared Radiation Source. Proc. of the Int. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011, s. 253–258.

[P75] WITEK K., PIOTROWSKI T., SKWAREK A.: Analysis of Polymer Foil Heaters as Infrared Radiation Sources. *Mat. Sci. a. Eng.* B (złoż. do red.).

[P76] ZARASKA K., GAUDYN J., BIEŃKOWSKI A., CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M.: Surface Properties of Laser-Etched LTCC Ceramic. Proc. of the 44th Int. Symp. on Microelectronics. Long Beach, USA, 9–13.10.2011, s. 000735-000739.

[P77] ZARASKA K., GAUDYN J., BIEŃKOWSKI A., DOHNALIK M., CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M., MACHNIK M., WÓJCIK K.: X-Ray Inspection of LTCC Devices: Theory and Practice. J. of Microelectron. a. Electron. Packag. 2011 vol. 8 s. 49–57.

[P78] ZARASKA K., GAUDYN J., BIEŃKOWSKI A., DOHNALIK M., CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M., MACHNIK M.: X-Ray Inspection of LTCC Devices. Proc. of the Ceramic Interconnect and Ceramic Microsystems Technologies. San Diego, USA, 5–7.04.2011, s. 000215–223.

[P79] ZARASKA K., ZIOMBER A., CIESIELCZYK K., BUGAJSKI A., ZARASKA W., THOR P.: Aktywność elektryczna nerwu błędnego u szczurów w zależności od stopnia sytości. *Folia Med. Cracov.* (złoż. do red.).

Prezentacje konferencyjne 2011

[K1] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., CIEŻ M., GROEGER B., RYDOSZ A.: Development of Technology for Manufacturing of Buried Channels in LTCC Structures. 12th Conf. of the Europ. Ceram. Soc. Sztokholm, Szwecja, 19–23.06.2011 (ref.).

[K2] CIEŻ M., PORADA Z.: Thick-Film Electroluminescent AND-Type Optoelectronic Logical Gate. LOPE-C 2011 Techn. & Sci. Conf. Frankfurt n. Menem, Niemcy, 28–30,06.2011 (plakat).

[K3] CZERWIŃSKI A., SKWAREK A., PŁUSKA M., RATAJCZAK J., WITEK K.: Tin Pest and Tin Oxidation on Tin-Rich Lead Free Alloys Investigated by Electron Microscopy Methods. The XIV Int. Conf. on Electron Microscopy. Wisła, 26–30,06.2011 (plakat).

[K4] DZIADAK B., MAKOWSKI Ł., KALICKI A., MICHALSKI A., STAROSZCZYK Z., MACHNIK M., CIEŻ M., ZARASKA K., GRZESIAK W., MOLENDA J., WIEJAK J.: Wykorzystanie systemów terytorialnie rozproszonych do monitoringu jakości wód powierzchniowych. XI Kongr. Budowy i Eksploatacji Urządzeń Technicznych. Radom, 28.11–1.12.2011 (ref.).

[K5] FILIPOWSKI W., SKWAREK A., WACZYŃSKI K., WRÓBEL E., DRABCZYK K.: Porównanie skuteczności procedury mycia podłoży krzemowych po procesie domieszkowania dyfuzyjnego warstwy emiterowej ogniwa fotowoltaicznego dla różnych rodzajów źródła domieszki fosforowej. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica Zdrój, 12–15.05.2011 (plakat).

[K6] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Sposób zagospodarowania uszkodzonych mechanicznie krzemowych ogniw fotowoltaicznych. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica Zdrój, 12–15.05.2011 (ref.).

[K7] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., PIEKARSKI J.: Application of Dedicated Integrated Circuits in MPPT Systems. 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011 (plakat, kom.).

[K8] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., ŻUPNIK M., WOJCIECHOWSKA R., KOŁTON A., KURPASKA S.: Nowoczesne systemy doświetlania roślin oparte o najnowsze osiągnięcia technologii SSL i LED. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat, kom.).

[K9] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., MOLENDA J.: Modelowanie i monitorowanie autonomicznych instalacji fotowoltaicznych dla potrzeb mobilnych stacji pomiarowych. Konf. "Metrologia wspomagana komputerowo". Waplewo, 24–27.05.2011 (ref.).

[K10] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Autonomiczne hybrydowe systemy fotowoltaiczne wspomagane ogniwami paliwowymi. II Kraj. Konf. Fotowoltaiki. Krynica Zdrój, 12–15.05.2011 (ref.).

[K11] GRZESIAK W., MAJ T., CIEŚLIŃSKI P.: Programowalny rezystor laboratoryjny. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat, kom.).

[K12] GRZESIAK W., ŻUPNIK M., PORADA Z.: Zastosowanie technologii SSL i LED w systemach oświetleniowych dla potrzeb muzeów i galerii sztuki. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat, kom.).

[K13] GUZDEK P., SIKORA M., GÓRA Ł., KAPUSTA C.: Magnetic and Magnetoelectric Properties of Nickel Ferrite – Lead Iron Niobate Relaxor. Eng. Ceramics 2011 from Materials to Component. Smolenice Castle, Słowacja, 8–12.05.2011 (plakat).

[K14] GUZDEK P., SIKORA M., GÓRA Ł., KAPUSTA C.: Efekt magnetoelektryczny w warstwowym kompozycie Ni_{0.3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe₂O₄-PbFe_{0.5}Nb_{0.5}O₃. XXXIX Szkoła Inżynierii Materiałowej. Krynica, 27–30,09.2011 (ref.).

[K15] JAROSZ A., WĄSOWSKI J., ZARASKA K.: CMOS Circuit for Detection of Neural Impulses. 18th Int. Conf. Mixed Design of Integrated Circuits and Systems. Gliwice, 16–18.06.2011 (ref.).

[K16] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Badania właściwości piezoelektrycznych folii z politetraftalanu etylenu PET pod kątem jej zastosowania na sensory ściskania i rozciągania. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat).

[K17] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Wpływ kierunku mechanicznego odkształcenia folii PVDF na wartość sygnału elektrycznego. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat).

[K18] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Dynamic Research of Foot Pressure Distribution – the Four-Points Shoe Insert with PVDF Sensors. 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011 (plakat).

[K19] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI SZ., MACHNIK M.: The Investigation of Electret Film Durability in Polyethylene Terephthalate (PET) from a Certain Angle of Their Application as Pressure Sensors. 2nd Int. Conf. on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies. Singapur, 26–28.02.2011 (ref.).

[K20] KLIMIEC E., ZARASKA W., PIEKARSKI J.: Research on Foot Pressure Distribution in Dynamic Conditions – Diagnostic of Flat Feet. Special Forum & Exhib. on Best of East – for Eastern

Partnership. Challenges and Opportunities for Collaboration European Union – Poland – Eastern Europe Countries. Warszawa, 28–30,11.2011 (ref., plakat).

[K21] KLIMIEC E., ZARASKA K., ZARASKA W., KUCZYŃSKI Sz.: Micropower Generators and Sensors Based on Piezoelectric Polypropylene PP and Polyvinylidene Fluoride Films – Energy Harvesting from Walking. 2nd Int. Conf. on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Technologies. Singapur, 26–28.02.2011 (ref.).

[K22] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D.: Fabrication and Properties of Multilayer Capacitors with Multicomponent Ferroelectric Dielectric. 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011 (plakat).

[K23] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GROEGER B.: Wielowarstwowe kondensatory z dielektrykiem $Bi_{1/2}Cu_{1/2}(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ wytwarzane technologią LTCC. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat).

[K24] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GUZDEK P.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Lead Iron Tungstate Composites. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (plakat).

[K25] KULAWIK J., SZWAGIERCZAK D., GUZDEK P.: Multiferroic Multilayer Composites Made in LTCC Technology Based on $Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$ Relaxator and $CoFe_2O_4$ Ferrite. 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011 (plakat).

[K26] ŁUKASIK A., SIBIŃSKI M., WALCZAK S.: Relaxation of Stresses in Polystyrene-Carbon Microcomposite Resistive Layers. Int. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011 (plakat).

[K27] MAKOWSKI Ł., ZARASKA K.: Przystosowanie i wykorzystanie interpretera języka Python w pomiarowym systemie wbudowanym. Konf. "Metrologia wspomagana komputerowo". Waplewo, 24–27.05.2011 (plakat).

[K28] MROCZKOWSKI M., CIEŻ M., KALENIK J.: Investigation of Multiple Degradation and Rejuvenation Cycles of Electroluminescent Thick Film Structures. 35th Int. Conf. of IMAPS – CPMT IEEE Poland. Gdańsk Sobieszewo, 21–24.09.2011 (plakat).

[K29] SKWAREK A., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., WITEK K.: Influence of Substrate Type on Tin Whisker Growth for Tin-Rich Lead-Free Solder Alloys. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011 (ref.).

[K30] SKWAREK A., WITEK K.: Lutowanie kondensacyjne – wybrane aspekty. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat).

[K31] STOCH P., STOCH A., KULAWIK J., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.3}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3^{-}0.7}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (plakat).

[K32] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of $_{0.3}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3^{-}0.7}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (plakat).

[K33] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Właściwości magnetoelektryczne związku _{0.3}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO_{3^{-0.7}}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O₃ VIII Konf. Polskiego Towarzystwa Ceramicznego. Zakopane, 22–25.09.2011 (plakat).

[K34] SZWAGIERCZAK D.: Internal Barrier Layer Capacitance Effects in Neodymium Copper Tantalate Ceramics. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (plakat).

[K35] SZWAGIERCZAK D.: Właściwości dielektryczne nieferroelektrycznej ceramiki Gd_{2/3}CuTa₄O₁₂ na kondensatory typu IBLC. X Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 5–9.06.2011 (plakat).

[K36] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Application of High Permittivity Bismuth Copper Titanate in Multilayer Capacitors. Advances in Applied Physics a. Materials Sci. Congr. Antalya, Turcja, 12–15.05.2011 (plakat).

[K37] WIELUNSKI M., WĘGRZECKI M., SARNECKI J., BAR J., BERCHTOLD F., BUDZYŃSKI T., CIEŻ M., GRABIEC P., HAIDER B., GRUBER E., KARINDA F., KULAWIK J., LIPIŃSKI D., PANAS A., RUHM W., WAHL W., SŁYSZ W., WĘGRZECKA I., WITEK K., ZABOROWSKI M.: PIN Diodes for Use in Radiation Protection. 14th Int. Congr. of Radiation Research. Warszawa, 28.08–1.09.2011 (plakat).

[K38] WITEK K., PIOTROWSKI T., SKWAREK A.: Analysis of Polymer Foil Heaters as Infrared Radiation Source. Conf. "Microtechnology and Thermal Problems in Electronics". Łódź, 28.06–1.07.2011 (plakat).

[K39] ZARASKA K., GAUDYN J., BIEŃKOWSKI A., CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M.: Surface Properties of Laser-Etched LTCC Ceramic. 44th Int. Symp. on Microelectronics IMAPS 2011. Long Beach, USA, 9–13.10.2011 (ref.).

[K40] ZARASKA K., GAUDYN J., BIEŃKOWSKI A., DOHNALIK M., CZERWIŃSKI A., PŁUSKA M., MACHNIK M.: X-Ray Inspection of LTCC Devices. Ceramic Interconnect a. Ceramic Microsystems Technologies. San Diego, USA, 5–7.04.2011 (ref.).

Patenty 2011

[PA1] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., KUCZYŃSKI Sz.: Gęstwa na dielektryk kondensatora. Nr zgł. P.394771 z dn. 4.05.2011.

[PA2] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GUZDEK P., STOCH A.: Multiferroiczny kompozyt ceramiczny. Nr zgł. P.394772 z dn. 4.05.2011.