ZAKŁAD MIKROELEKTRONIKI

Kierownik: dr inż. Michał CIEŻ
e-mail: mciez@ite.waw.pl
tel. (0-12) 656 51 83, fax 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, inż. Ryszard Knapik, mgr inż. Szymon Kuczyński, 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. Wstęp

Zakład Mikroelektroniki realizował w 2010 r. następujące projekty badawcze:

- „Opracowanie zaawansowanych mikro-nanomateriałów i rozwiązań układowych oraz ich zastosowanie w nowoczesnych podzespołach, systemach i zintegrowanych strukturach LTCC". Etap I (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);
- „Elektrodowe warstwy ceramiczne o strukturze perowskitu do czujników gazów i tlenkowych ogniw paliwowych" (projekt badawczy nr N 507 4322 33);
- „Charakterystyka właściwości piezoelektrycznych elektroaktywnych polimerów EAP w aspekcie projektowania systemów inteligentnych" (projekt badawczy nr N 507 4634 33);
- „Opracowanie past do wytwarzania warstwowych struktur elektroluminescencyjnych" (projekt badawczy nr N 515 4423 33);
- „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 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);
- „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".

2. Najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze

W Zakładzie kontynuowano prace dotyczące syntezy i charakteryzacji nowych generacji materiałów przeznaczonych do wytwarzania elektrochemicznych ogniw paliwowych, czujników, podzespołów elektronicznych, mikroukładów LTCC. Prace badawcze obejmowały syntezę materiałów wyjściowych, dobór składu kompozycji, wytworzenie folii ceramicznych i past oraz ich charakteryzację. Prowadzono poszerzone badania zjawisk starzeniowych w połączeniach wykonanych stopami bezołowiowymi. Zrealizowano projekty zawierające nowe rozwiązania układowe dla potrzeb systemów fotowoltaicznych i elektroniki medycznej. W rozwoju technologii procesów podjęto prace w celu wprowadzenia technologii ablacji laserowej do wytwarzania sieci połączeń w układach LTCC, a także wytwarzania trwałych struktur mikrofluidalnych w układach LTCC.

Najważniejsze, wyróżniające się osiągnięcia to:

- dobór składu i warunków wytwarzania metodą odlewania folii kompozytowych opartych na niklu i tlenku cyrkonu, przeznaczonych na anody miniaturowych tlenkowych ogniw paliwowych. Istotnym osiągnięciem jest uzyskanie dla tych tworzyw silnie porowatej mikrostruktury i wysokiego, metalicznego przewodnictwa elektrycznego;
- dobór składu i metodyka otrzymywania folii ceramicznych o właściwościach magnetycznych i kompozytów multiferroicznych w technologii LTCC. Oryginalnym zastosowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie relaksorowych ferroelektryków, takich jak Pb $(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$, Pb $(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$,Pb $(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$, będących równocześnie jednofazowymi multiferroikami;
- opracowanie składów nanokompozytów polimerowo-węglowych z wykorzystaniem nanorurek węglowych (jedno- i wielościennych), niezbędnych do wytworzenia past rezystywnych i przewodzących nakładanych techniką sitodruku na elektroizolacyjne podłoża;
- wyniki prac dotyczących identyfikacji mechanizmów degradacji połączeń lutowanych stopami bezołowiowymi o dużym znaczeniu praktycznym. Zrealizowano poszerzone badania zjawisk tworzenia się wiskerów oraz zarazy cynowej. W procesie lutowania wprowadzono nową technologię lutowania kondensacyjnego w fazie gazowej i sprawdzono wpływ tej technologii na tworzenie się wiskerów;

- opracowanie techniki badań struktur LTCC wykorzystującej mikrotomografię rentgenowską.

2.1. Otrzymywanie i charakterystyka komponentów miniaturowych tlenkowych ogniw paliwowych (etap I)

Ogniwa paliwowe są urządzeniami elektrochemicznymi, które wytwarzają energię elektryczną i ciepło bezpośrednio z zachodzącej w nich reakcji chemicznej wodoru z tlenem. Ich zaletami są: bardzo wysoka sprawność produkcji energii elektrycznej i ciepła, brak zanieczyszczania środowiska naturalnego, duża niezawodność, długi czas życia, mniejszy rozmiar i ciężar w porównaniu z innymi źródłami energii o podobnej mocy, odporność na zakłócenia, cicha praca i możliwość stosowania różnych paliw. W ciągu ostatnich 20 lat ogniwa paliwowe są coraz szerzej wykorzystywane w przenośnych urządzeniach elektronicznych (laptopy, telefony komórkowe), w systemach awaryjnych, generatorach małej i dużej mocy, elektrowniach stacjonarnych, robotyce, samochodach, do zasilania urządzeń medycznych, aparatury pomiarowej, komputerów itp.

Paliwem dla ogniw paliwowych jest czysty wodór lub inne paliwa bogate w wodór, doprowadzane w sposób ciągły do anody. Na anodzie z cząsteczki wodoru H_2 powstaje proton H^+ i elektron, na katodzie zachodzi redukcja tlenu do jonów O^{2-}. W ogniwie ma miejsce transport jonów poprzez elektrolit od jednej elektrody do drugiej, a w obwodzie zewnętrznym przepływ elektronów od anody do katody.

Przedmiotem badań w projekcie były ogniwa tlenkowe (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC), będące jednym z podstawowych rodzajów ogniw paliwowych. Ogniwo tlenkowe jest zbudowane z anody i katody, przedzielonych elektrolitem stałym wykazującym przewodnictwo jonowe. Ogniwo takie pracuje w wysokich temperaturach 650 ÷ 1000°C. Typowe tlenkowe ogniwo paliwowe jest złożone z cermetowej kompozytowej anody Ni/YSZ, elektrolitu stałego na bazie tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (YSZ) lub tlenku ceru domieszkowanego tlenkiem gadolinu (GDC) i z katody opartej na niestechiometrycznych tlenkach o strukturze krystalicznej perowskitu o ogólnym wzorze $Ln_{1-x}A_xBO_{3\pm\delta}$ (jako Ln oznaczono jony lantanowców, np. La, Ce, Pr, Sm, Gd, jako A domieszki jonów metali ziem alkalicznych, np. Ca, Sr, a jako B jony metali przejściowych, np. Mn, Fe, Co, Ni). Popularnym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest stosowanie planarnego ogniwa z podtrzymującą anodą grubości 500 ÷ 1500 μm, otrzymaną metodą odlewania folii lub prasowania, na którą są naniesione sitodrukiem warstwy elektrolitu stałego i perowskitowej katody grubości od kilkunastu do kilkudziesięciu mikrometrów.

Każdy z komponentów ogniwa tlenkowego musi spełniać określone wymagania. Zadaniem anody jest stworzenie miejsc reakcyjnych do elektrochemicznego utleniania paliwa podczas pracy w temperaturze 650 ÷ 1000°C. Materiał anodowy powinien odznaczać się wysokim przewodnictwem elektronowym, wysoką aktywnością katalityczną w reakcji utleniania wodoru, stabilnością w warunkach reduku-

jących oraz kompatybilnością termiczną i chemiczną z elektrolitem stałym. Wymagana jest wysoka porowatość anody ułatwiająca transport paliwa do miejsca reakcji i usuwanie produktów reakcji, takich jak woda.

Rozwój ogniw tlenkowych i ich praktyczne zastosowanie są uzależnione w dużym stopniu od wprowadzania tańszych materiałów na komponenty ogniwa paliwowego, obniżenia temperatury jego pracy i zmniejszenia kosztów wytwarzania ogniwa. Celem zadania w projekcie statutowym było opracowanie składów i warunków otrzymywania metodą odlewania folii oraz charakterystyka poszczególnych komponentów miniaturowych tlenkowych ogniw paliwowych. W pierwszym etapie zadania opracowano składy i metodykę wytwarzania folii przeznaczonych na kompozytowe anody ogniw paliwowych opartych na niklu i tlenku cyrkonu oraz wykonano charakterystykę ich właściwości.

Opracowanie składów i metodyki wytwarzania anod kompozytowych

Do otrzymywania kompozytowych anod cermetowych opartych na niklu i tlenku cyrkonu, przeznaczonych do tlenkowych ogniw paliwowych, zastosowano metodę odlewania folii (tape casting). Pierwszym etapem było opracowanie składów gęstw przeznaczonych do odlewania. Gęstwy sporządzono przez zmieszanie w młynku kulowym składników nieorganicznych ze starannie dobraną ilością dodatków organicznych. Jako składniki organiczne zastosowano poliwinylobutyral jako spoiwo, olej rybi jako dyspersant, glikol polietylenowy i ftalan dwubutylu jako plastyfikatory, toluen i izopropanol jako rozpuszczalniki. Dodatkowo do zestawu wprowadzono grafit w celu zwiększenia porowatości anody po wypaleniu.

Zastosowano dwie metody otrzymywania nieorganicznych proszków do anody Ni-YSZ. Pierwsza z nich polegała na zmieszaniu w młynku kulowym tlenku NiO (99,8%, Aldrich, <50 nm) oraz ZrO_2-8%Y_2O_3 (Tosoh TZ-8Y, cząsteczki o średnicy 0,3 μm skupione w granulach o średnicy 40 μm) w stosunku wagowym 2:1. W drugiej metodzie przeprowadzano bezprądową metalizację niklem proszku YSZ na drodze redukcji chemicznej. Proszek tlenku cyrkonu uczulano przy użyciu roztworu $SnCl_2$ i aktywowano przy pomocy roztworu $PdCl_2$. Warstwy niklu osadzano na cząsteczkach tlenku cyrkonu poprzez chemiczną redukcję jonów Ni^{2+} pochodzących z roztworu $NiCl_2$ przy użyciu podfosforynu sodu. Proces prowadzono w temperaturze 40 ÷ 50°C przy pH = 5. Zawartość niklu po metalizacji, określona przez trawienie w kwasie azotowym, wynosiła 6% wag. Zawartość niklu w wyjściowej mieszaninie zwiększano do poziomu przekraczającego próg perkolacji przez dodanie do zestawu masy lejnej 33 ÷ 50% wag. NiO.

Folie anodowe odlewano za pomocą urządzenia firmy R. Mistler TTC-1200. Po wysuszeniu w temperaturze 50°C ich grubość wynosiła 150 ÷ 250 μm. Folie charakteryzowały się wysoką gładkością, elastycznością i wytrzymałością mechaniczną.

Przy użyciu lasera E-355-3-G-OA firmy Oxford Laser wycinano odpowiedniej wielkości arkusze z surowych folii anodowych oraz otwory do pozycjonowania.

Do pomiarów przewodnictwa elektrycznego przygotowano próbki testowe z materiału anodowego grubości 1 ÷ 2 mm. Po wstępnej laminacji przy użyciu prasy jednoosiowej 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.

Następnie dobrano warunki wypalania folii anodowych oraz współspiekania z folią elektrolitu stałego na bazie tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru. Profile wypału w piecu komorowym dobierano tak, aby zapewnić powolny wypał składników organicznych, umiarkowany stopień spieczenia anody i powolne chłodzenie próbki. Proces spiekania prowadzono w zakresie temperatur 1250 ÷ 1350°C przez 2 – 5 h. Ze względu na to, że po procesie spiekania anoda zawiera NiO i YSZ, przeprowadzano redukcję tlenku do metalicznego niklu poprzez wygrzewanie w temperaturze 950°C przez 2 h w atmosferze redukującej w postaci mieszaniny azot-10% H_2.

Charakterystyka mikrostruktury i przewodności elektrycznej anod kompozytowych

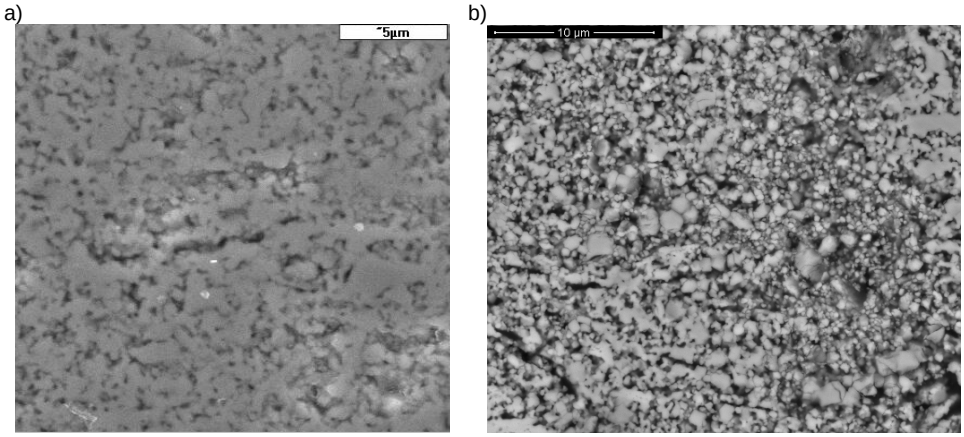
Skurcz folii po procesie spiekania wynosił ok. 20%. Nie stwierdzono dodatkowego skurczu anody po procesie redukcji w porównaniu z wymiarami próbek po procesie spiekania. Sugeruje to tworzenie się sztywnego, ciągłego szkieletu YSZ, który zapobiega dalszemu spiekaniu się cząstek niklu podczas redukcji anody.

Elektrochemiczna wydajność anody zależy w dużym stopniu od jej mikrostruktury – porowatości, krętości porów, wielkości i rozmieszczenia ziaren. Porowatość powstająca w wyniku wypalania polimeru i innych konwencjonalnych organicznych składników gęstwy oraz będąca wynikiem redukcji NiO może być niewystarczająca dla właściwego działania anody wskutek zbyt wysokiej polaryzacji stężeniowej. Korzystnym, powszechnie stosowanym rozwiązaniem jest wprowadzenie do masy lejnej dodatkowych składników organicznych, takich jak grafit, sadza, skrobia. Są one po wypaleniu anody źródłem zwiększonej porowatości.

Mikrostrukturę elektrod i ich współpracę z elektrolitem stałym badano przy użyciu mikroskopu skaningowego firmy Jeol. Na rys. 1 pokazano zdjęcia skaningowe zgładów przekrojów anody wykonanych dwiema metodami. Rysunek 1a przedstawia anodę otrzymaną przez zmieszanie NiO i YSZ po procesie spiekania, a rys. 1b anodę zawierająca ziarna YSZ metalizowane chemicznie niklem po procesie spiekania i redukcji.

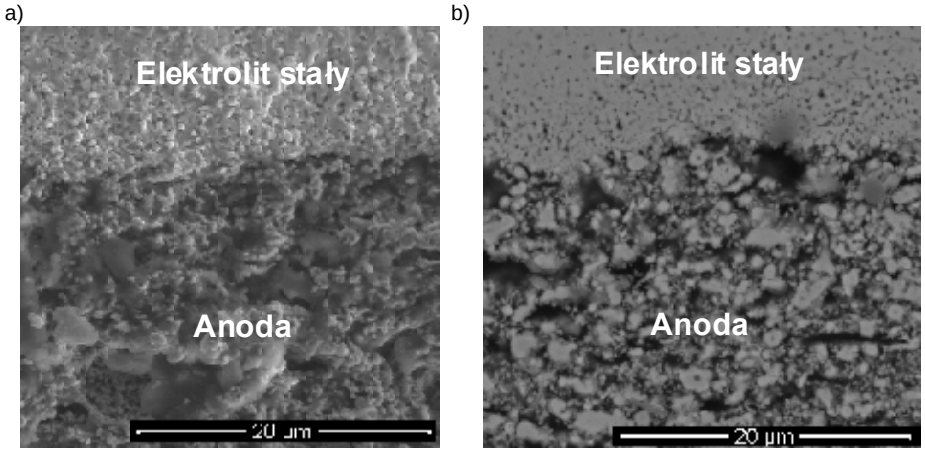
W obu rodzajach anod zaobserwowano znaczną, pożądaną porowatość otwartą, pochodzącą z wypału PVB i grafitu. W zredukowanej anodzie następuje dalszy wzrost porowatości ze względu na redukcję NiO do Ni i ubytek tlenu. Z obrazów skaningowych wynika, że pory tworzą ciągłą sieć w obrębie anody. Wielkość porowatości wyznaczona metodą Archimedesa wynosiła odpowiednio 27% i 31% dla anody po spiekaniu i po redukcji w przypadku zastosowania do jej wytwarzania konwencjonalnej metody mieszania tlenków NiO i YSZ. Dla anody zawierającej ni-

kiel osadzany na tlenku cyrkonu w wyniku redukcji chemicznej porowatość była nieco wyższa i wynosiła odpowiednio 43% i 49% w spiekanej i zredukowanej elektrodzie.



Rys. 1. Obrazy z mikroskopu skaningowego zgładów: a) anody otrzymanej przez zmieszanie NiO i YSZ po procesie spiekania, b) anody zawierającej metalizowany niklem YSZ po procesie spiekania i redukcji

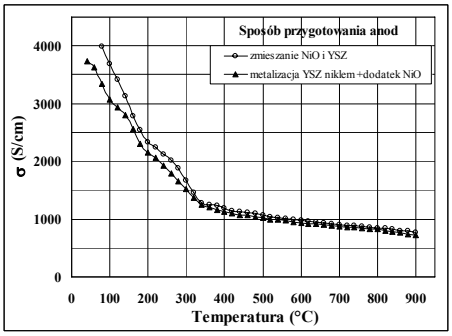
Na rys. 2a,b przedstawiono przełam i zgład granicy faz elektrolit stały YSZ/anoda Ni-YSZ (zawierająca chemicznie naniesiony nikiel) dla próbki po procesie spiekania i redukcji. Rysunek ten ilustruje dobrą kompatybilność wytworzonej anody z elektrolitem stałym na bazie tlenku cyrkonu, brak delaminacji lub obcych wytrąceń na granicach faz.



Rys. 2. Obrazy z mikroskopu skaningowego próbki po procesie spiekaniu i redukcji w obszarze granicy faz elektrolit stały YSZ/anoda zawierająca metalizowany niklem YSZ: a) przełam, b) zgład

Przewodnictwo elektryczne wytworzonych anod mierzono w zakresie temperatur 20 ÷ 900°C metodą czteropunktową w atmosferze redukującej, wytworzonej poprzez przepływ przez komorę pomiarową mieszanki gazowej azot-10% H_2. Na rys. 3 porównano zależność temperaturową przewodności elektrycznej anod Ni/YSZ wytwarzanych przy użyciu dwóch metod. Ze wzrostem temperatury wartości σ maleją w całym badanym zakresie temperatur 20 ÷ 900°C, co świadczy

o metalicznym charakterze przewodzenia. Przewodność w temperaturze 900°C jest zbliżona do czystego Ni. Wykresy są podobne dla obu metod wytwarzania materiałów anodowych. Jednak przy prawie tych samych wartościach przewodności w przypadku anody zawierającej nikiel osadzany na drodze bezprądowej metalizacji zawartość metalu jest niższa (56% wag.) niż w przypadku anody wytwarzanej ze zmieszanych tlenków NiO i YSZ (60% wag.). Efekt ten jest zgodny z wynikami innych autorów, którzy wykazali, że zastosowa- nie tej metody pozwala na obniżenie progu perkolacji dla metalicznego przewodzenia w anodzie Ni/YSZ.



Rys. 3. Porównanie zależności temperaturowej przewodnictwa dwóch rodzajów anod Ni-YSZ: otrzymanej przez zmieszanie tlenków NiO i YSZ oraz zawierającej oprócz NiO nikiel osadzany na drodze bezprądowej metalizacji tlenku cyrkonu

Podsumowanie

Opracowano skład i metodykę wytwarzania metodą odlewania folii jednego z komponentów ogniwa paliwowego – anody kompozytowej na bazie tlenku niklu i tlenku cyrkonu. Dobrano warunki laminacji folii anodowych i obróbki termicznej pakietów po prasowaniu. Wprowadzony do masy lejnej grafit zapewnił uzyskanie odpowiedniej porowatości anody, wynoszącej 27 ÷ 49% w próbkach po spiekaniu w temperaturze 1250 ÷ 1300°C. Porównano anody zawierające nikiel wprowadzony dwiema metodami: przez zmieszanie tlenków NiO i YSZ oraz przez bezprądową metalizację tlenku cyrkonu. Oba rodzaje anod charakteryzowały się pożądaną porowatą mikrostrukturą i wysokim metalicznym przewodnictwem elektrycznym. Korzystniejszą, niższą zawartość niklu i lepszą kompatybilność z elektrolitem stałym podczas procesu współspiekania wykazywały anody otrzymane drugą metodą.

2.2. Opracowanie funkcjonalnych folii ceramicznych i ich zastosowanie na elementy bierne w strukturach LTCC (etap I)

Multiferroiki są to materiały wykazujące równocześnie dwie (lub więcej) właściwości ferroiczne (ferromagnetyzm, ferroelektryczność, ferroelastyczność). W materiałach tych zewnętrzne pole magnetyczne wywołuje polaryzację elektryczną, a zewnętrzne pole elektryczne indukuje magnetyzację. Możliwość przełączania stanu ferroelektrycznego polem magnetycznym i stanu ferromagnetycznego polem elektrycznym stwarza szerokie możliwości nowych zastosowań: w pamięciach, czujnikach, aktuatorach, falowodach, modulatorach, przetwornikach itd. Niewiele jednofazowych materiałów wykazuje właściwości multiferroiczne, dlatego znacz-

nie częściej w praktyce stosuje się materiały kompozytowe, złożone na ogół z perowskitowych warstw ferroelektrycznych i spinelowych warstw ferromagnetycznych. Typowym rozwiązaniem jest wykorzystanie piezoelektrycznych perowskitów $BaTiO_3$, $PbTiO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$ jako fazy ferroelektrycznej i ferrytów $(Ni,Zn)Fe_2O_4$, $CoFe_2O_4$ jako fazy ferromagnetycznej. Znacznie mniej zbadanym rozwiązaniem jest realizowane w projekcie zastosowanie relaksorowych ferroelektryków, takich jak $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$, $Pb(Fe_{1/2}Nb_{1/2})O_3$, $Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$, będących równocześnie jednofazowymi multiferroikami.

Wykorzystanie w projekcie metody odlewania folii (tape casting) i współspiekania do wytwarzania elementów multiferroicznych sprzyja ich miniaturyzacji i umożliwia integrację w układzie elektronicznym. Ponadto dla kompozytów warstwowych możliwe jest uzyskanie silniejszego efektu magnetoelektrycznego niż w przypadku litych kompozytów ceramicznych.

Dobór składów i metodyka wytwarzania folii magnetycznych i kompozytów multiferroicznych

Syntezę poszczególnych składników nieorganicznych przeznaczonych na folie magnetyczne i kompozyty multiferroiczne przeprowadzono na drodze konwencjonalnej reakcji w fazie stałej. Wytwarzano dwa rodzaje magnetycznych materiałów ferrytowych o strukturze spinelu – $CoFe_2O_4$ (CF) i $(Ni,Zn)Fe_2O_4$ (NZT). Syntezę ferrytów $CoFe_2O_4$ i $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$ przeprowadzono w temperaturze 1050°C. Do syntezy ferroelektrycznego składnika kompozytów multiferroicznych – relaksora $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ (PFT) o strukturze perowskitu zastosowano dwuetapową metodę wolframitową. Naprzód przeprowadzono reakcję Fe_2O_3 i Ta_2O_5 w temperaturze 1000°C, a następnie reakcję PbO z wolframitem $FeTaO_4$ w temperaturze 850°C. Poszczególne produkty syntezy nieorganicznych związków mielono w młynku kulowym firmy Fritsch w alkoholu izopropylowym przez 8 h.

Ferryt $CoFe_2O_4$ jest magnetycznie twardym materiałem o temperaturze Curie 790 K, wysokim polu koercji, dość wysokiej magnetyzacji nasycenia i dobrej stabilności chemicznej. Dzięki silnym właściwościom magnetostrykcyjnym jest dobrym kandydatem na składnik warstwowych kompozytów wykazujących efekt magnetoelektryczny. Ferryt $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$ jest materiałem magnetycznie miękkim o temperaturze Curie ok. 400 K. Ma bardzo wąską pętlę histerezy magnetycznej o dużej magnetyzacji nasycenia, co pozwala na jego zastosowanie w biernych elementach elektronicznych.

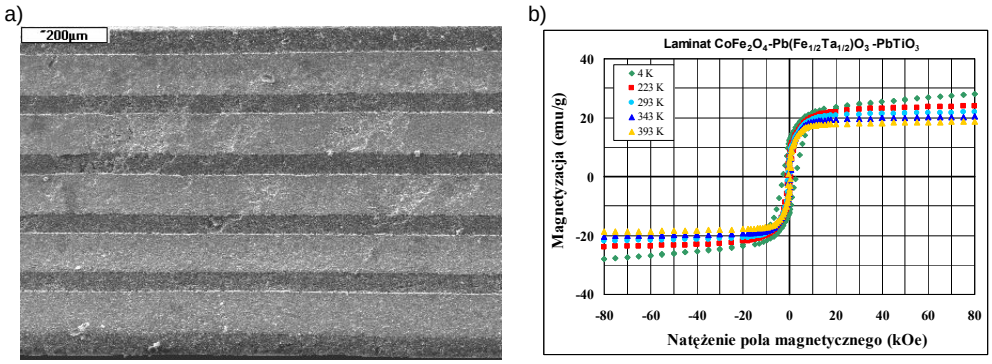
Opracowano składy trzech rodzajów gęstw przeznaczonych do odlewania – dwóch folii ferrytowych o składach $CoFe_2O_4$ i $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$ oraz folii ferroelektrycznej o składzie $_{0,85}Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_{3-0,15}PbTiO_3$. Gęstwy sporządzono przez zmieszanie w młynku kulowym składników nieorganicznych z dodatkami organicznymi. W skład części organicznej gęstw wchodziły: poliwinylobutyral jako spoiwo, olej rybi jako dyspersant, glikol polietylenowy i ftalan dwubutylu jako plastyfikatory, toluen i izopropanol jako rozpuszczalniki.

Folie odlewano przy użyciu urządzenia firmy R. Mistler TTC-1200, a następnie suszono w temperaturze 50°C. Szerokość szczeliny w zastawce dobierano tak, aby uzyskać grubość surowej folii ok. 100 ÷ 130 μm. Otrzymane folie charakteryzowały się gładkością, elastycznością i wytrzymałością mechaniczną.

Proces otrzymywania warstwowych kompozytów multiferroicznych obejmował następujące operacje: mielenie zestawów do syntezy ferrytu i ferroelektryka, syntezę ferrytu, syntezę ferroelektryka, mielenie produktów syntezy, naważanie w odpowiednich proporcjach składników nieorganicznych (ferrytu lub ferroelektryka) i składników organicznych mas lejnych, mielenie gęstw, odlewanie folii ferrytowej i ferroelektrycznej, suszenie folii, wycinanie arkuszy przy użyciu lasera, układanie w stos naprzemiennie folii ferrytowych i ferroelektrycznych, prasowanie izostatyczne pakietów, wypalanie składników organicznych i współspiekanie kompozytu warstwowego. Proces współspiekania prowadzono w temperaturze 950°C przez 2 h. Starannie dobierano profil ogrzewania i chłodzenia laminatów, aby uniknąć delaminacji, pękania i wypaczania się kompozytu złożonego z materiałów o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej i różnych skurczliwościach wynikających z usuwania składników organicznych.

Mikrostruktura oraz właściwości magnetyczne i magnetoelektryczne kompozytów multiferroicznych

Na rys. 4a przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego przełamu warstwowego kompozytu złożonego z naprzemiennie ułożonych warstw ferroelektryka $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-$PbTiO_3$ i ferrytu $CoFe_2O_4$. Oba rodzaje warstw są dobrze spieczone. Widoczna jest dobra współpraca między warstwami, brak delaminacji, pęknięć i wytrąceń na granicach faz. Brak warstwy pośredniej na granicy faz potwierdzono przy użyciu analizy metodą EDS.

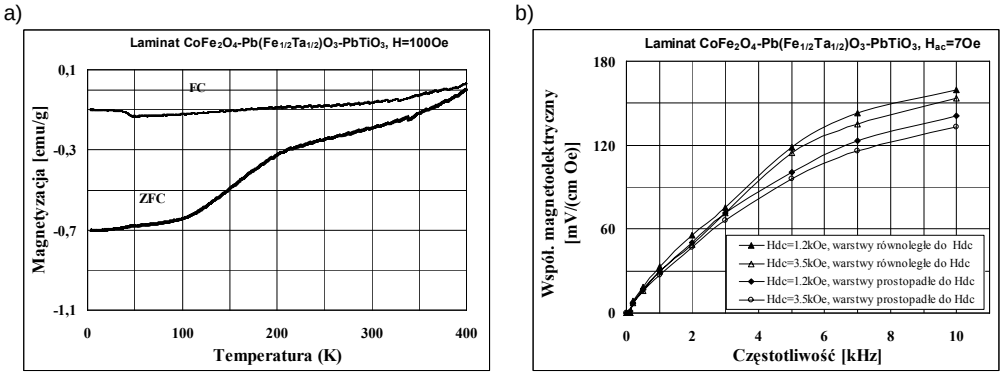


Rys. 4. a) Obraz z mikroskopu skaningowego przełamów warstwowego kompozytu multiferroicznego złożonego z warstw ferrytu $CoFe_2O_4$ (ciemne obszary) i ferroelektryka $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-$PbTiO_3$ (jasne obszary), b) magnetyczna histereza w zakresie temperatur 4 ÷ 343 K dla warstwowego kompozytu CF-PFT-PT

Przy zastosowaniu magnetometru Quantum Design z wibrującą próbką przeprowadzono pomiary magnetyzacji w zakresie temperatur 4 ÷ 393 K w funkcji natężenia pola magnetycznego dla warstwowych kompozytów multiferroicznych CF-PFT-PT.

Na rys. 4b przedstawiono wykresy histerezy magnetycznej dla pięciu temperatur z zakresu 4 ÷ 393 K. W niskich temperaturach krzywe histerezy są stosunkowo szerokie, typowe dla magnetycznie twardych materiałów. Pole koercji maleje ze wzrostem temperatury od 2,87 kOe w temperaturze 4 K do 0,44 kOe w temperaturze 393 K. Magnetyzacja odpowiadająca płaskiej części pętli histerezy, zbliżona do magnetyzacji nasycenia, maleje od 28,3 emu/g w temperaturze 4 K do 18,8 emu/g w temperaturze 393 K dla maksymalnego zastosowanego pola H_{dc} = = 80 kOe. Maksymalne wartości magnetyzacji nasycenia dla badanych kompozytów ze względu na obecność warstw ferroelektrycznych są 2 – 3 razy mniejsze niż dla czystego ferrytu $CoFe_2O_4$ (66 ÷ 80 emu/g).

Na rys. 5a przedstawiono temperaturową zależność magnetyzacji kompozytu CF-PFT-PT po schłodzeniu próbki w zerowym polu magnetycznym (krzywa *ZFC* – zero field cooled) oraz po schłodzeniu w polu (krzywa *FC* – field cooled). Na krzywej *FC* obserwuje się dwa płaskie maksima w temperaturze 17 i 220 K. Gwałtowny spadek magnetyzacji na krzywej *FC* w zakresie temperatur 17 ÷ 43 K można przypisać antyferromagnetycznej przemianie fazy relaksorowej PFT. Rozwidlenie krzywych *ZFC* i *FC*, zwiększające się ze spadkiem temperatury, może wskazywać na zachowanie magnetyczne typu szkła spinowego fazy ferrytowej w niskich temperaturach.



Rys. 5. a) Magnetyzacja w funkcji temperatury dla próbki chłodzonej bez pola magnetycznego (*ZFC*) oraz chłodzonej w polu magnetycznym H = 100 Oe (*FC*), b) magnetoelektryczny współczynnik napięciowy dla warstwowych kompozytów CF-PFT-PT w funkcji częstotliwości zmiennego pola magnetycznego

Próbka przeznaczona do pomiarów magnetoelektrycznych była umieszczona w zewnętrznym polu magnetycznym H_{dc} wytworzonym przez elektromagnes oraz w sinusoidalnym zmiennym polu magnetycznym H_{ac} wytworzonym przez cewki Helmholtza. Między powierzchniami próbki było generowane napięcie wywołane efektem magnetoelektrycznym. Współczynnik magnetoelektryczny *ME* obliczano na podstawie zależności:

$$ME = \frac{V}{H_{ac} \cdot d},$$

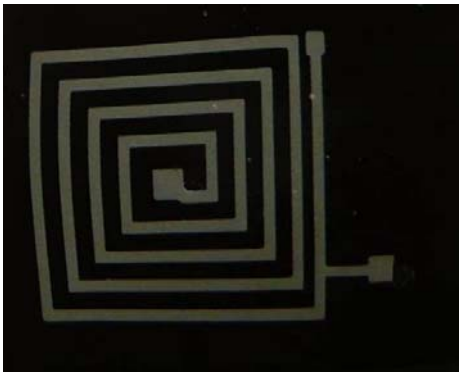
gdzie: V – napięcie generowane wskutek efektu magnetoelektrycznego, H_{ac} – natężenie sinusoidalnego pola magnetycznego, d – grubość próbki

Efekt magnetoelektryczny dla warstwowych kompozytów jest zależny od zastosowanego pola magnetycznego, rezystywności, liczby i grubości warstw oraz sprzężenia mechanicznego między warstwami.

Mierzono efekt magnetoelektryczny w temperaturze pokojowej dla kilku różnych wartości natężenia stałego pola magnetycznego i dla częstotliwości zmiennego pola magnetycznego w zakresie 10 Hz ÷ 10 kHz. Stwierdzono, że spieczony laminat CF-PFT-PT wykazuje znaczny efekt magnetoelektryczny, co ilustruje rys. 5b. Współczynnik magnetoelektryczny lekko maleje ze wzrostem natężenia stałego pola magnetycznego H_{dc} w zakresie 0,3 ÷ 7,2 kOe. Współczynnik ten rośnie ze wzrostem częstotliwości sinusoidalnego zmiennego pola magnetycznego w zakresie 0,1 ÷ 10 kHz, osiągając 160 mV/(cmOe) dla 10 kHz. W zakresie niższych natężeń pola *ac* (1,2 i 3,5 kOe) zaobserwowano mniejsze wartości *ME* przy silniejszym polu *ac*. Trudno jest jednoznacznie określić wpływ kierunku stałego pola magnetycznego skierowanego równolegle lub prostopadle względem położenia warstw w kompozycie. Wpływ ten nie jest zbyt silny i wydaje się zależny od częstotliwości zmiennego pola magnetycznego *ac* oraz historii próbki.

Właściwości cewki wykonanej w technologii LTCC

Folię magnetyczną z miękkiego ferrytu $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$ grubości 110 μm wykorzystano do wykonania jednowarstwowej mikrocewki w technologii LTCC. Bezpośrednio na folię magnetyczną naniesiono metodą sitodruku ścieżki przewodzące w kształcie spirali składającej się z czterech zwoi (rys. 6). Szerokość ścieżki wynosiła 250 μm, a odstęp między ścieżkami 500 μm. Następnie warstwę magnetyczną z nadrukowaną cewką ułożono w środku między dziesięcioma warstwami magnetycznymi, które stanowiły zamknięty magnetyczny rdzeń cewki. Stos ten poddano laminowaniu w temperaturze 40°C pod ciśnieniem 10 ÷ 15 MPa oraz współspiekaniu w temperaturze 950°C. W celach porównawczych w analogiczny sposób wykonano cewkę na standardowym podłożu niemagnetycznym (DP951) oraz cewkę, która miała rdzeń magnetyczny tylko z jednej strony.



Rys. 6. Widok cewki nadrukowanej na podłożu magnetycznym

Podsumowanie

Przy zastosowaniu metody odlewania wytworzono ferroelektryczne folie oparte na roztworze stałym 85% mol relaksora $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-15% mol. normalnego

ferroelektryka $PbTiO_3$ oraz folie ferromagnetyczne oparte na ferrytach – $CoFe_2O_4$ i $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$. Wykonano elementy multiferroiczne w technologii LTCC, stanowiące kompozyt złożony z naprzemiennie ułożonych warstw folii ferrytowej $CoFe_2O_4$ i ferroelektrycznej $Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-$PbTiO_3$. Laminaty multiferroiczne po procesie współspiekania odznaczały się dobrym stopniem spieczenia obu rodzajów warstw i brakiem delaminacji. Kompozyty wykazywały właściwości magnetyczne oraz wyraźny efekt magnetoelektryczny. Współczynnik magnetoelektryczny wzrastał ze wzrostem częstotliwości zmiennego pola magnetycznego i wynosił 160 mV/ /(cmOe) (dla H_{dc} = 3,5 Oe, H_{ac} = 7 Oe, f = 10 kHz). Folię magnetyczną z miękkiego ferrytu $Ni_{0,3}Zn_{0,62}Cu_{0,08}Fe_2O_4$ wykorzystano do wykonania jednowarstwowej mikrocewki w technologii LTCC o indukcyjności 300 nH.

2.3. Badania jakości połączeń stopami lutowniczymi bezołowiowymi

Rok 2010 był kolejnym rokiem obowiązywania w praktyce gospodarczej Dyrektywy RoHS, powodującej m. in. eliminację stopów lutowniczych zawierających ołów z większości produkowanego w krajach Unii Europejskiej sprzętu elektrycznego i elektronicznego. Na podstawie obserwacji rynku lokalnego można stwierdzić, że wskutek pojawiających się potwierdzonych informacji o mniejszej niezawodności sprzętu elektronicznego i utrudnieniach technologicznych związanych z lutowaniem bezołowiowym, stosowane jest ono tylko tam, gdzie bezwzględnie nakazuje tego prawo.

W tym etapie zadania skoncentrowano się na dalszych, poszerzonych badaniach dotyczących szczególnie zjawiska wiskerów w aspekcie długotrwałego narażania próbek wykonanych odpowiednio technologią lutowania kondensacyjnego i konwekcyjnego. Praca została zrealizowana w ścisłej współpracy z Zakładem Badań Materiałów i Struktur Półprzewodnikowych.

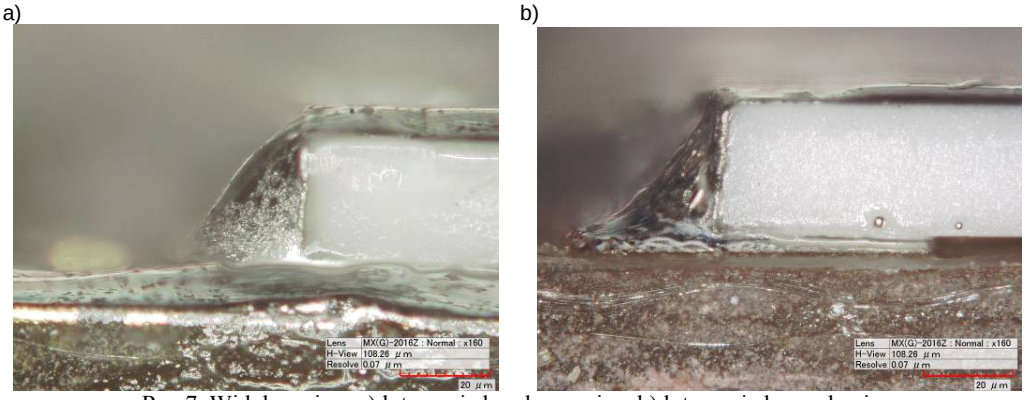
Badania w obrębie spoin lutowniczych wykonywanych lutami bezołowiowymi

Wykonano i przygotowano do badań próbki z zastosowaniem różnych stopów bezołowiowych. Za szczególnie istotne zostały uznane próbki wykonane ze stopu Sn100C o składzie $Sn_{99,3}Cu_{0,7}Ni$, gdyż jest on przedstawiany jako tańszy zamiennik dominujących na rynku stopów typu SAC (SnAgCu). Podstawowym celem badań w tym etapie było określenie wpływu przyjętej technologii lutowania na podatność spoin na występowanie w ich obszarze zjawiska wiskerów. W tym celu przygotowano próbki, w których rezystory SMD 1206 przylutowano do podłoży testowych PCB alternatywnie z pokryciami Au/Ni oraz Sn, wykorzystując dwie metody lutowania: konwekcyjnego oraz kondensacyjnego (VPS). Za szczególnie ważną, w aspekcie ewentualnego ograniczania rozwoju wiskerów, uznano tutaj drugą z nich. Powodem tego było doniesienie literaturowe mówiące o tym, że lutowanie VPS powoduje zmniejszenie grubości faz międzymetalicznych SnNi

oraz SnCu, co z kolei powinno skutkować zmniejszeniem podatności na występowanie wiskerów.

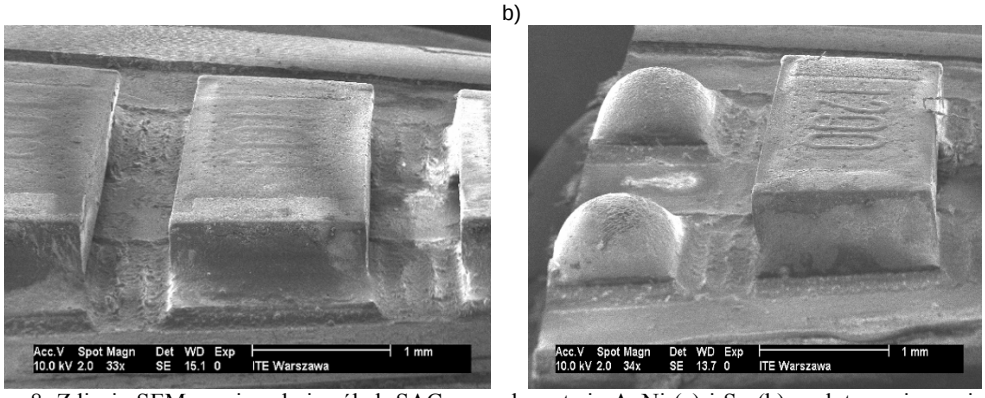
Wstępnie próbki poddano ocenie wizualnej za pomocą ostatnio zakupionego mikroskopu cyfrowego KH 7700 firmy Hirox. Jak widać na rys. 7, wykonane spoiny lutownicze charakteryzują się dobrą jakością, bez pęknięć, dziur i rozwarstawień. Spoiny wykonane metodą kondensacyjną są pełniejsze, a ich powierzchnie bardziej gładkie, prawdopodobnie dlatego, że lutowanie kondensacyjne jest lutowaniem beztlenowym. Dobrą jakość spoin lutowniczych wykonanych metodą kondensacyjną potwierdzają ich fotografie wykonane metodą SEM (rys. 8). Próbki zostały następnie poddane działaniu długotrwałych szoków termicznych o stopniu obostrzenia –40/+85°C/1500 szoków.

a) b)



Rys.7. Widok spoiny: a) lutowanie kondensacyjne, b) lutowanie konwekcyjne

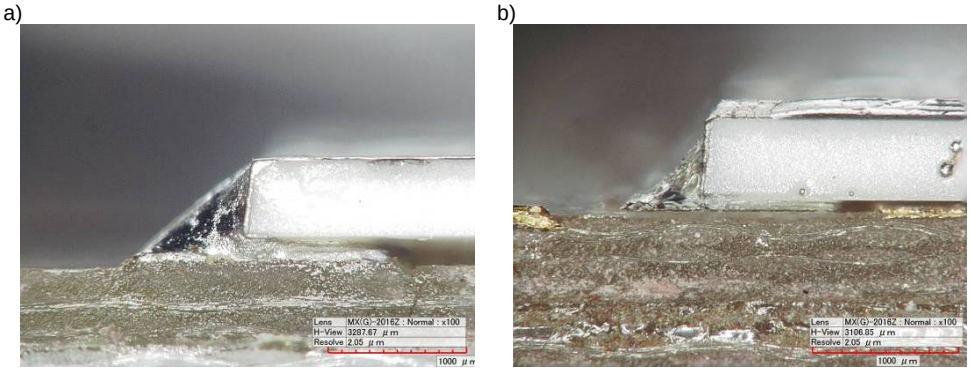
a) b)



Rys. 8. Zdjęcia SEM powierzchni próbek SAC na podwarstwie AuNi (a) i Sn (b) po lutowaniu w piecu kondensacyjnym

Ocena wyglądu zewnętrznego spoin lutowniczych

Na rys. 9 przedstawiono przykłady spoin lutowniczych wykonanych odpowiednio metodą lutowania kondensacyjnego i konwekcyjnego po narażeniu na działanie szoków. Nie zaobserwowano pogorszenia jakości spoin, aczkolwiek spoina wykonana z użyciem lutowania kondensacyjnego nadal pozostawała w lepszej kondycji.



Rys. 9. Widok spoin lutowniczych próbek SAC na NiAu po narażeniach długotrwałych: a) lutowanie konsensacyjne, b) lutowanie konwekcyjne

Badania występowania wiskerów na powierzchniach próbek

Kontroli SEM poddano powierzchnię próbek poddanych narażaniu 1500 szoków termicznych –40/+85°C. Oceniano zarówno spoiny lutownicze, jak i metalizację rezystorów SMD. Wyniki zestawiono w tab. 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów długości wiskerów na powierzchniach badanych próbek

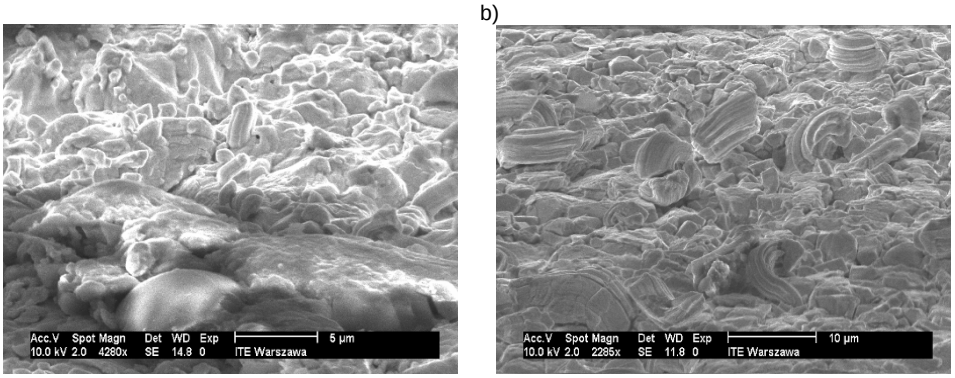
Spoiwo/pokrycie	Rodzaj lutowania			
	kondensacyjne		konwekcyjne	
	spoina	rezystor	spoina	rezystor
SAC/Sn	brak	brak	brak	brak
SAC/AuNi	brak	2,5 μm	brak	brak
Sn100C/Sn	brak	5,0 μm	brak	brak
Sn100C/AuNi	brak	8,0 μm	brak	brak

Jak widać, nie stwierdzono obecności wiskerów na powierzchni spoin lutowniczych wykonanych w różnych konfiguracjach materiałowych i technologicznych, co należy uznać za wynik pozytywny. Nieliczne ich formacje o stosunkowo niewielkiej długości zlokalizowano na wierzchniej metalizacji rezystorów SMD (rys. 10) i to wyłącznie przy zastosowaniu kondensacyjnej metody lutowania. Należy dodać, że metalizacja ta jest wykonywana pastami cermetowymi srebrowymi o niewielkiej domieszce palladu lub platyny, a więc zaobserwowane wiskery były monokryształami Ag.

Na rys. 11 przedstawiono wyniki badań sił ścinających spoin lutowniczych badanych próbek po ich narażeniu szokami termicznymi. Dla obu metod lutowania uzyskano wyniki na dość podobnym, stosunkowo wysokim poziomie w granicach $30 \div 40$ N. Pewną niewielką przewagę metody konwekcyjnej można wiązać z tworzeniem się w niej faz międzymetalicznych o większej grubości, które są z kolei

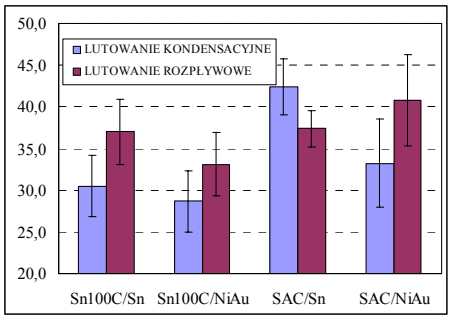
odpowiedzialne za większą odporność mechaniczną spoin, ale też mogą być przyczyną większej podatności spoiny na powstanie wiskerów.

a) b)



Rys. 10. Zdjęcia SEM skupisk wiskerów w obrębie metalizacji rezystorów SMD dla lutowania kondensacyjnego: SAC/NiAu (a) i Sn100c/NiAu (b)

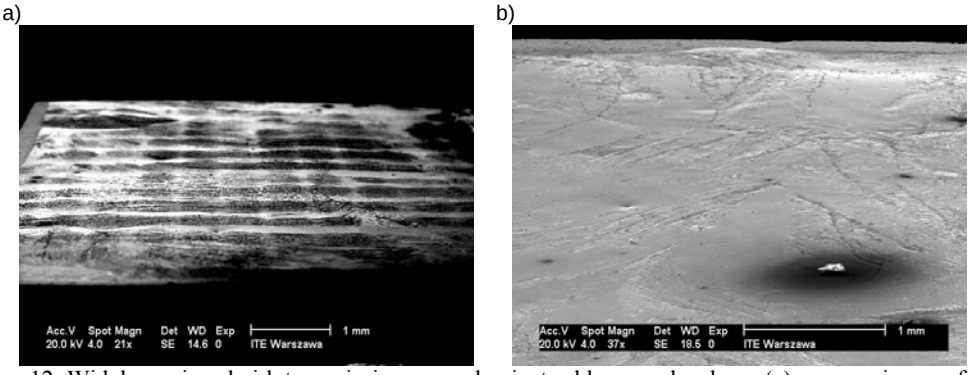
Zależność występowania wiskerów od typu i od położenia względem szczególnych miejsc laminatu



Rys. 11. Wpływ rodzaju lutowania na wielkość siły ścinającej dla różnych stopów i powłok lutowniczych

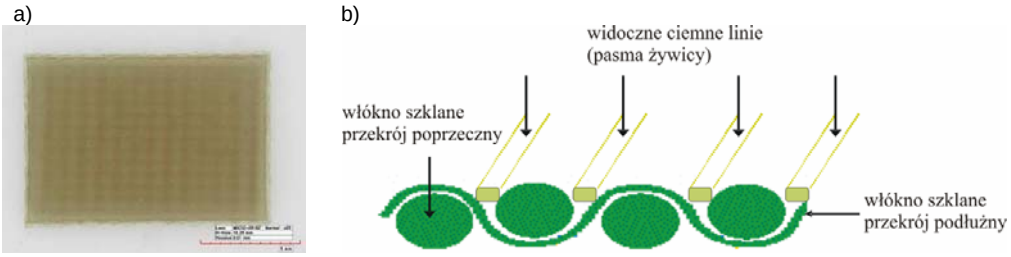
Na podstawie szczegółowej analizy wszystkich próbek stopów naniesionych na podłoże szklano-epoksydowe stwierdzono, że istnieją niezależne od składu stopu, preferencyjne rejony powstawania wiskerów na powierzchni próbek narażonych na działanie szoków termicznych. Zaobserwowano, że struktura laminatu szklano-epoksydowego zostaje odwzorowana na powierzchni warstwy (rys. 12). Efektu tego nie obserwuje się na laminacie papierowo-fenolowym. Stwierdzono, że na wszystkich próbkach na laminacie szklano-epoksydowym wiskery rosną w położeniach odpowiadających szczególnym miejscom laminatu.

a) b)

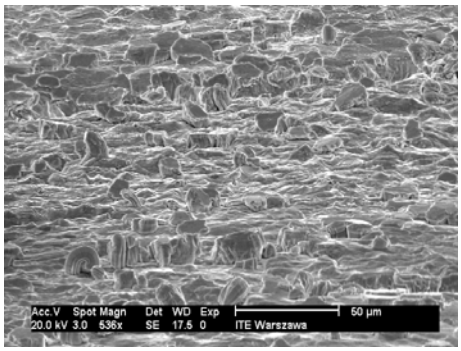


Rys. 12. Widok powierzchni lutu naniesionego na laminat szklano-epoksydowy (a) oraz papierowo-fenolowy (b)

Laminat szklano-epoksydowy powstaje w wyniku nasycenia żywicą epoksydową tkaniny szklanej i sprasowania jej w układzie warstwowym. W widoku ogólnym można zaobserwować kratkę. Pola są rozdzielone od siebie przez fragmenty ramki, a cała ramka łączy się ze sobą tworząc widoczną kratkę (rys. 13). Jaśniejsze obszary widoczne na rysunku stanowią włókna szklane, a ciemniejsze obszary żywicy.



Rys. 13. Laminat szklano-epoksydowy. Widok ogólny. Ciemne linie są nazywane ramką kratki, a jasne pola – polami kratki



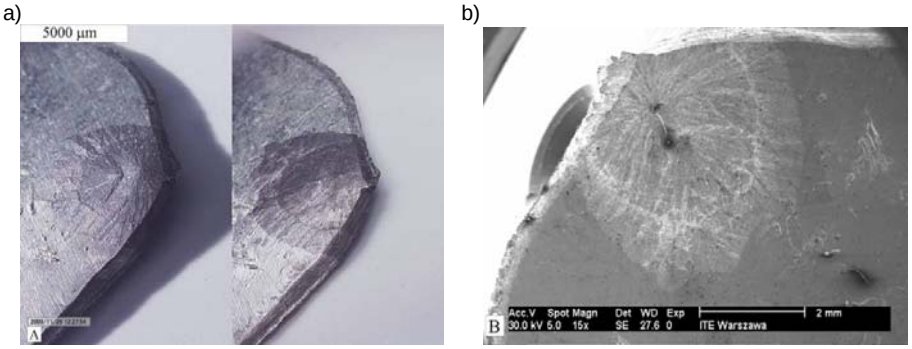
Rys. 14. Występowanie skupiska wiskerów w obszarze pola odpowiadającego włóknu szklanemu (stop $Sn_{99}Cu_1$)

Na wszystkich próbkach na laminacie szklano-epoksydowym stwierdzono obecność wiskerów (rys. 14) prawie wyłącznie w obszarach stanowiących jasne pole obserwowanej kratki, a nie na ciemnej ramce kratki.

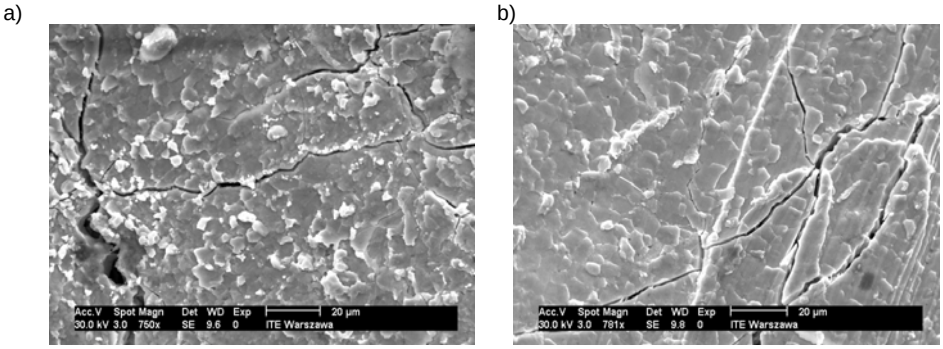
Zjawisko to można wytłumaczyć lokalnymi różnicami współczynnika rozszerzalności liniowej części laminatu zawierającej włókna szklane i żywicę. Podczas stresu temperaturowego laminat rozciąga się zarówno wzdłuż, jak i w poprzek swojego przekroju. Ponieważ laminat jest połączeniem dwóch rodzajów materiałów: żywicy i włókna szklanego, które mają inne wartości współczynników rozszerzalności liniowej (żywica ok. 100 ppm/°C, włókno szklane ok. 6 ppm/°C), więc prawdopodobnie na skutek stresu temperaturowego górna warstwa laminatu rozszerza się niejednolicie w swoim przekroju poprzecznym (obszary żywicy bardziej niż obszary włókna szklanego). Skutkować to może pojawianiem się większych lokalnych naprężeń wewnętrznych w obszarach włókna szklanego w porównaniu z obszarami zajmowanymi przez żywicę i wzrostem wiskerów w tym właśnie miejscu.

Badania występowania zjawiska zarazy cynowej

Dalsze szczegółowe obserwacje zarazy cynowej były prowadzone na próbkach z grup poddanych obróbce mechanicznej, na których zaraza wcześniej już występowała po 17 miesiącach. Po 22 miesiącach zaobserwowano rozrost stożków zarazy cynowej widoczny na rys. 15. Intensyfikacja liczby i rozmiaru pęknięć nastąpiła wraz ze wzrostem powierzchni zajmowanej przez cynę α (rys. 16).

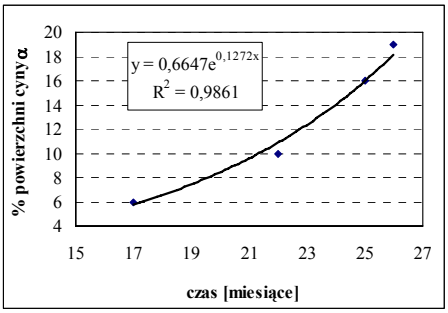


Rys. 15. Powierzchnia próbki $Sn_{99}Cu_1$ prasowanej na zimno po 22 miesiącach przechowywania w temperaturze −18°C: a) zdjęcie wykonane za pomocą mikroskopu optycznego Hirox, b) obraz SEM



Rys. 16. Obraz SEM powierzchni próbki $Sn_{99}Cu_1$ prasowanej na zimno (różne obszary) po 22 miesiącach przechowywania w temperaturze −18°C z widocznymi wielokrotnymi pęknięciami

Procent powierzchni próbki zajmowanej przez cynę α w funkcji czasu trwania narażenia pokazano na rys. 17. Dla punktów doświadczalnych można dopasować krzywą wykładniczą, uzyskując wysoką wartość współczynnika dopasowania R^2 = 0,9861. Wykładniczy wzrost powierzchni zajętej przez cynę α w czasie narażenia na ujemną temperaturę potwierdza autokratalityczną rolę cyny α. Gdyby nie było zjawiska autokatalizy, prawdopodobieństwo pojawiania się zarazy nie zależałoby od obecności zarazy na pozostałym obszarze próbki, wobec czego wzrost pola powierzchni zarazy z czasem byłby inny niż wykładniczy.



Rys. 17. Zależność procentu obszaru próbki, na którym występuje cyna α (zaraza cynowa), od czasu trwania narażenia w temperaturze −18°C dla próbki $Sn_{99}Cu_1$

Opis procesu technologicznego lutowania kondensacyjnego (VPS)

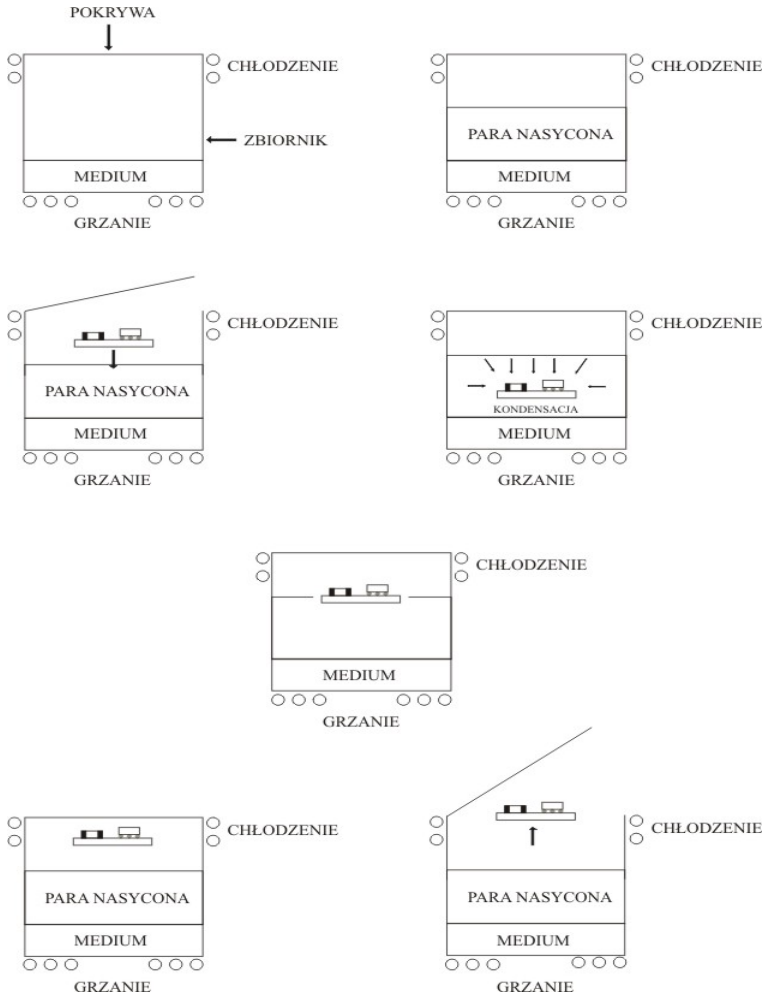
Pierwsze współczesne systemy lutowania kondensacyjnego z regulacją zmiennego gradientu temperatury powstały w połowie lat 90-tych. W przeciwieństwie do stosowanej poprzednio metody wtryskowej technologia ta wykorzystuje zjawisko

pary nasyconej, łącząc w sobie wszystkie zalety lutowania kondensacyjnego w celu uzyskania stabilnego i powtarzalnego procesu lutowania. Strefa lutowania znajduje się bezpośrednio nad zbiornikiem z medium, które jest podgrzewane za pomocą umieszczonych pod nim płyt grzejnych, tworząc bezpośrednio nad jego powierzchnią warstwę pary nasyconej. Z uwagi na fakt, że para jest cięższa od powietrza, nie może ona opuścić zbiornika. W momencie wprowadzenia lutowanego obwodu do strefy pary warstwa pary nasyconej ulega zaburzeniu. Para skrapla się na całej powierzchni wprowadzonej płytki i natychmiast tworzy wokół niej szczelną warstwę grubości ok. 0,2 mm. W przeciwieństwie do starszych systemów VPS układ sterowania przeciwdziała nagłemu oddaniu układowi nadmiernej energii. Napięcie powierzchniowe warstwy medium oraz oddziaływanie sił kapilarnych powodują całkowite usunięcie z niego cząsteczek powietrza, co skutkuje tym, że proces lutowania odbywa się w całkowicie beztlenowej atmosferze. Po opuszczeniu przez układ strefy pary nasyconej medium całkowicie odparowuje z jego powierzchni nie pozostawiając resztek.

Obszar pary nasyconej rozciąga się bezpośrednio wokół powłoki medium, którą są pokryte lutowane elementy elektroniczne i pola lutownicze. W wyniku wprowadzenia przez element grzejny określonej ilości energii odpowiadającej wymaganemu gradientowi temperatury zostaje wytworzona odpowiednia ilość pary nasyconej ekwiwalentna do tej energii. Ta określona ilość pary, poprzez kondensację na warstwie medium, oddaje do niej energię, podnosząc w efekcie proporcjonalnie temperaturę układu. Proces ten zapewnia ciągłe i jednorodne podgrzewanie układu i trwa do momentu zrównania temperatur pary nasyconej i układu. W tym momencie proces kondensacji ulega samoczynnemu zatrzymaniu. Opisany proces pozwala na precyzyjną kontrolę temperatury poprzez dokładną regulację energii zasilającej. W przeciwieństwie do metody wtryskowej proces lutowania zachodzi w parze nasyconej, której temperatura nie może przekroczyć temperatury wrzenia medium, co z kolei eliminuje możliwość wystąpienia przegrzań układu.

Dodatkowo pionowa struktura systemu pracującego w parze nasyconej pozwala operatorowi na pełną identyfikację zakończenia procesu w każdym momencie, niezależnie od charakterystyki lutowanego układu. Proces powinien być zakończony tak szybko, jak to możliwe, ponieważ układy nie mogą przebywać w temperaturze lutowania zbyt długo. W przeciwieństwie do stosowanych dawniej systemów poziomych VPS (Vapour Phase Soldering) systemy pionowe eliminują stosowanie pomp oraz mechanicznych systemów zamykania i otwierania komór lutowniczych, co w sposób oczywisty skraca czas procesu.

Na rys. 18 przedstawiono kolejne fazy procesu VPS. Wykonany ze stali nierdzewnej zbiornik jest podgrzewany od spodu przez sekcję grzałek wytwarzających temperaturę ok. +300°C. Wokół górnej części zbiornika zamontowana jest chłodnica napełniona wodą destylowaną z dodatkiem glikolu, od góry zbiornik jest zabezpieczony uszczelnioną pokrywą.

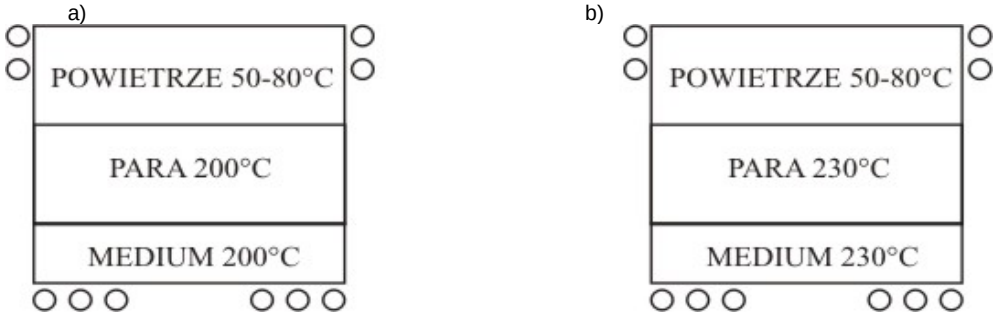


Rys. 18. Schemat procesu technologicznego lutowania kondensacyjnego

W pierwszym kroku cyklu technologicznego na dno zbiornika zostaje wlany Galden, a następnie włączona sekcja grzałek. Po okresie ok. 30 min. zbiornik wypełnia się parą nasyconą i w tym momencie może rozpocząć się proces lutowania. Z góry są opuszczane w strefę pary nasyconej położone na ruchomym stoliku lutowane układy, na których odbywa się trwający kilka minut proces kondensacji pary nasyconej i w jego efekcie przylutowanie elementów do płytki. Następnie stolik automatycznie podnosi się do góry wchodząc do strefy chłodzenia, w której zatrzymuje się na okres od kilku do kilkudziesięciu sekund. W tym etapie następuje schłodzenie lutowanych układów połączone z odparowaniem z ich powierzchni pozostałości Galdenu. Ostatecznie stolik z układami powraca do pozycji wyjściowej i są one po otwarciu pokrywy wyjmowane na zewnątrz. W opisanym procesie przebieg temperaturowej charakterystyki pieca lutowniczego jest w przybliżeniu liniowy.

Ciekawe rozwiązanie zastosowała w swoich piecach firma IBL-Loettechnik GmbH z Niemiec, wprowadzając podgrzewanie wstępne lutowanych układów w temperaturze +150°C przez okres ok. 60 s, uzyskując przez to charakterystykę grzania z plateau bardzo zbliżoną do charakterystyk pieców konwekcyjnych. Opatentowany proces polega na tym, że po krótkim etapie kondensacji wstępnej stolik z układami jest podnoszony do granicy strefy pary nasyconej, a dopiero później opuszczany do pozycji dolnej. Według autorów tego rozwiązania zmniejsza ono ilość pustych przestrzeni w spoinie, zapobiega tombstoningowi oraz nadmiernym stresom termicznym. Proces ten został przez jego twórców nazwany mianem Soft Vapor Phase (SVP).

W procesie lutowania niesłychanie ważnym czynnikiem jest dobór właściwego rodzaju Galdenu, co jest oczywiście związane z temperaturą lutowania. Jak podają źródła literaturowe, w celu skutecznego lutowania wystarczy, by temperatura pary nasyconej była zaledwie o 5 do 10°C wyższa od temperatury topnienia stopu lutowniczego. Należy pamiętać, że w piecach konwekcyjnych ta wielkość wynosi od 30 do 35°C. Na rys. 19a,b przedstawiono zalecane w procesie VPS rozkłady temperatur w komorze pieca lutowniczego, odpowiednio dla lutów ołowiowych o temperaturze topnienia +183°C oraz bezołowiowych, np. typu SAC, o temperaturze topnienia +217°C. Praktycznie jednak, jak wykazały doświadczenia własne, przy zróżnicowanej produkcji ciągła wymiana Galdenu wiązałaby się z jego znacznymi stratami, a więc w takich przypadkach zarówno dla stopów ołowiowych, jak i bezołowiowych jest stosowany Galden o wyższej temperaturze topnienia.



Rys. 19. Zalecany rozkład temperatur w komorze pieca do lutowania kondensacyjnego: a) lutowanie spoiwami ołowiowymi, b) lutowanie spoiwami bezołowiowymi

Lutowanie kondensacyjne jest perspektywiczną technologią lutowania, szczególnie dla miniaturowych elementów elektronicznych. W trakcie realizacji zadania wdrożono tę technologię do produkcji małoseryjnej zdobywając pierwsze doświadczenia. Należy podkreślić, że uzyskano lepszy wygląd spoin lutowniczych w porównaniu do stosowanej równolegle metody konwekcyjnej.

W następnym etapie zadania planowane jest prowadzenie dalszych badań nad lutami bezołowiowymi z wykorzystaniem miniaturowych elementów elektronicznych, w tym również z zastosowaniem technologii lutowania kondensacyjnego.

Podsumowanie

Badania spoin lutowniczych próbek wykonanych różnymi stopami lutowniczymi i różnymi metodami lutowania po długotrwałych narażeniach klimatycznych nie wykazały obecności wiskerów. Jednocześnie zaobserwowano niewielką ich ilość na powierzchniach metalizacji rezystorów SMD.

Szczegółowa analiza wszystkich próbek stopów naniesionych na podłoże szklano--epoksydowe pozwoliła na zaobserwowanie, że istnieją niezależne od składu stopu, preferencyjne rejony powstawania wiskerów na powierzchni próbek narażonych na działanie szoków termicznych. Zaobserwowano, że struktura laminatu szklano--epoksydowego zostaje odwzorowana na powierzchni warstwy. Efektu tego nie obserwuje się na laminacie papierowo-fenolowym. Stwierdzono na wszystkich próbkach na laminacie szklano-epoksydowym obecność wiskerów prawie wyłącznie w obszarach stanowiących pole obserwowanej kratki. Laminaty szklano-epoksydowe są powszechnie stosowanymi rodzajami laminatów używanych jako podłoża obwodów drukowanych. Obserwacja ta odnosi się do większości wytwarzanych układów.

W wyniku obserwacji rozwoju zarazy cynowej na próbkach poddanych długotrwałemu działaniu zimna wyciągnięto wniosek o autokatalitycznej roli cyny ze względu na wykładniczy wzrost jej powierzchni w funkcji czasu.

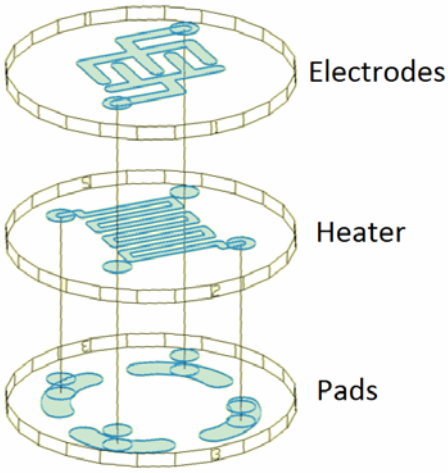
2.4. Doskonalenie procesów technologii LTCC oraz metod projektowania i konstruowania mikroukładów i elementów przeznaczonych do produkcji technologią LTCC

Celem prac prowadzonych w 2010 r. było wytworzenie rzeczywistych, użytecznych struktur LTCC. Skoncentrowano się na trzech tematach:

- doskonalenie techniki wytwarzania precyzyjnych wzorów ścieżek przewodzących metodą selektywnej ablacji laserowej materiału przewodzącego i jej zastosowanie do wytworzenia wielowarstwowej struktury podłoża do czujnika gazu (we współpracy z AGH);
- opracowanie metod wytwarzania wnęk i kanałów w strukturach LTCC i ich zastosowanie do wytworzenia filtru mikrofalowego (we współpracy z AGH);
- opracowanie i wytworzenie układu LTCC zawierającego elementy bierne zintegrowane w strukturze LTCC oraz elementy aktywne montowane w technice SMD – realizacja przetwornicy DC/DC.

Podłoże do czujnika gazu

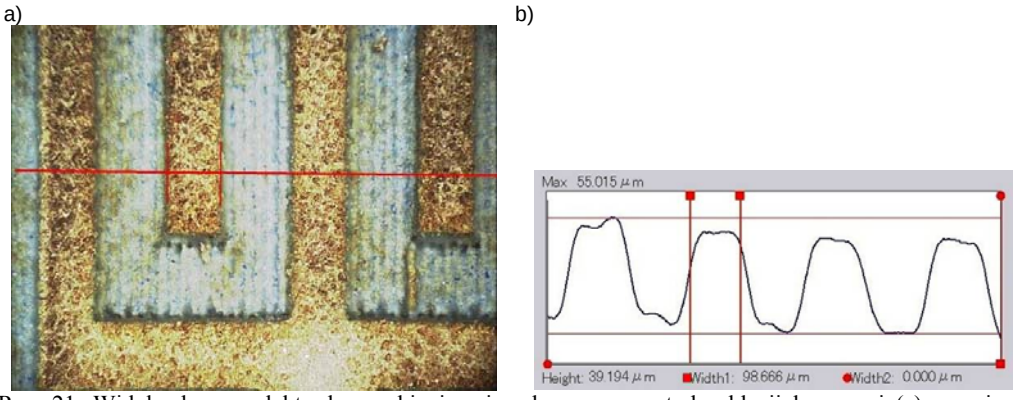
Przygotowany we współpracy z AGH schemat warstw struktury jest przedstawiony rys. 20. Górna warstwa zawiera elektrody do cienkowarstwowego naniesienia warstwy gazoczułej (AGH). Warstwa środkowa zawiera grzejnik, natomiast warstwa dolna – elektrody wyprowadzające zasilanie grzejnika oraz elektrod.



Rys. 20. Schemat struktury czujnika gazu

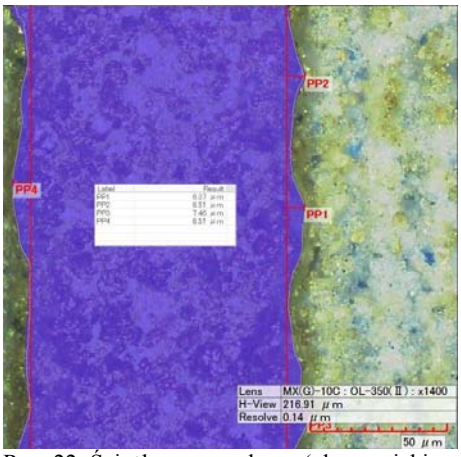
W celu realizacji struktury rozwinięto opracowaną w 2009 r. technikę szybkiego prototypowania układów LTCC przez laserową obróbkę warstwy przewodzącej. Stworzono nową wersję programu do konwersji automatycznej rysunku projektowego na polecenia sterujące dla urządzenia do obróbki laserowej. Program na podstawie położenia punktów bazujących na obrabianym podłożu automatycznie dokonuje bazowania wycinanego wzoru. Dzięki temu możliwa jest precyzyjna obróbka naniesionych sitodrukiem warstw przewodzących lub funkcjonalnych oraz precyzyjne wycinanie obrysu wypalonej struktury.

Rysunek 21 przedstawia widok obszaru elektrody grzebieniowej na górnej warstwie struktury. Elektroda ta została wykonana metodą selektywnej ablacji warstwy przewodzącej. Zbliżenie ścieżki przewodzącej przedstawia rys. 22. Jak widać, opracowana metoda zapewnia precyzję wytwarzania na poziomie ±3,5 μm (licząc od środka wykonanej linii).



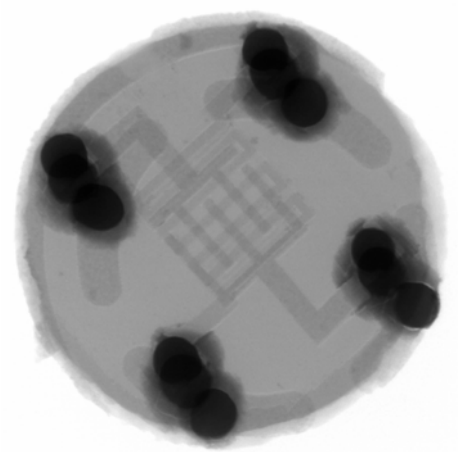
Rys. 21. Widok obszaru elektrody grzebieniowej wykonanego metodą ablacji laserowej (a) oraz jego przekrój (b)

Po wydrukowaniu, złożeniu i laminacji struktur wycięto laserem UV obrys zewnętrzny. Następnie struktury zostały wypalone. Widok ukończonej struktury przedstawia rys. 23. Wykonano osiem sztuk czujnika, z czego cztery miały poprawne parametry elektryczne (rezystancja grzejnika 7 ÷ 10 Ω), dwie wykazywały przerwanie połączeń, natomiast dwie miały zwarcia. Inspekcja rentgenowska uszkodzonych egzemplarzy (rys. 24) wykazała, że przyczyną zwarć jest wypłynięcie pasty wypełniającej połączenia międzywarstwowe poza obszar otworu viasu.



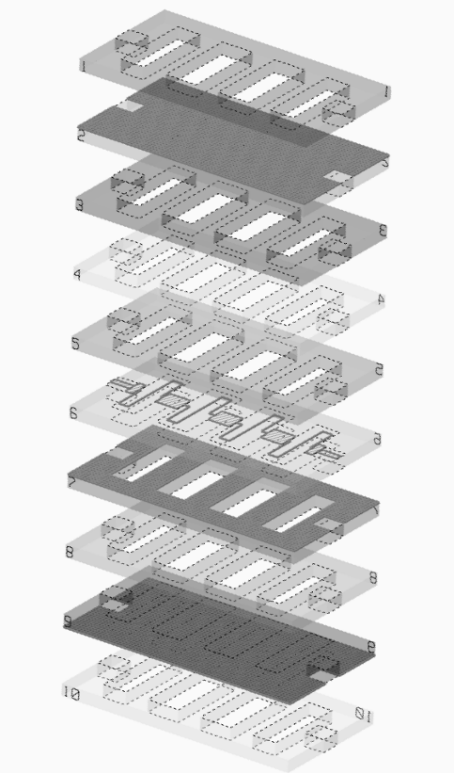
Rys. 22. Ścieżka przewodząca (obszar niebieski – powiększenie)

Rys. 23. Wykonana struktura czujnika gazu


Rys. 24. Zdjęcie rentgenowskie wadliwej struktury. Ciemnoszare obszary wokół viasów (kolor czarny) oznaczają wypłynięcie pasty wypełniającej połączenia międzywarstwowe między warstwy folii ceramicznej.

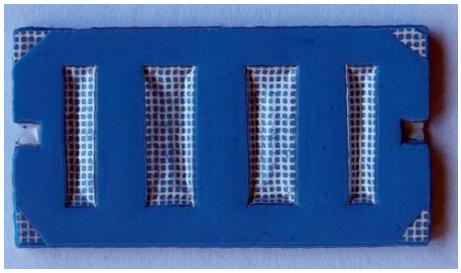
Filtr mikrofalowy

Podjęto próbę wykonania filtru mikrofalowego na pasmo 1 GHz według projektu opracowanego w Katedrze Elektroniki AGH. Schemat struktury jest przedstawiony na rys. 25.

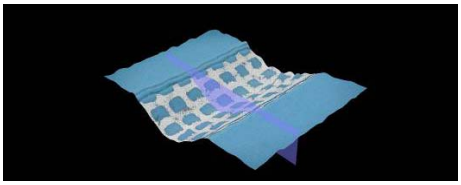

Rys. 25. Struktura warstw filtru mikrofalowego

Struktura wykorzystuje 20 warstw taśmy DP951 (o grubości po wypale 100 μm), po dwie warstwy fizyczne na każdą warstwę w projekcie. Ścieżki przewodzące na warstwie sygnałowej (warstwa 6 i 7) oraz płaszczyzny masowe (warstwa 2 i 9) wykonano metodą sitodruku z pasty DP 6142D. Wnęki rezonansowe umieszczone są zarówno nad, jak i pod warstwą sygnałową. Zrealizowana struktura jest pokazana na rys. 26.

W czasie prób wykonania struktur stwierdzono, że następuje zjawisko niedopuszczalnego zapadania się warstwy folii ceramicznej umieszczonej nad pustymi wnękami rezonansowymi (rys. 27). Zjawisko to jest spowodowane



Rys. 26. Wykonana struktura filtra mikrofalowego

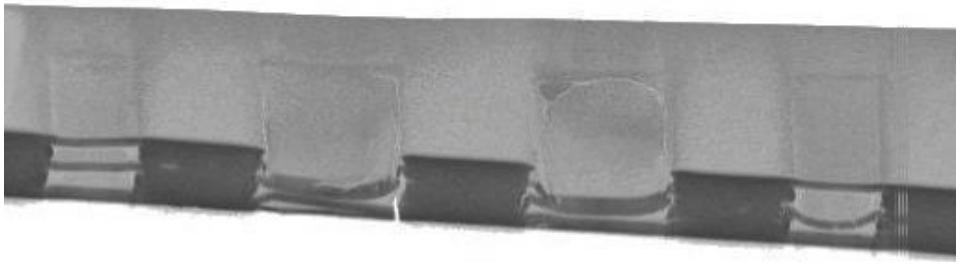


Rys. 27. Trójwymiarowy obraz skrajnej wnęki rezonansowej

działaniem na zewnętrzne warstwy ciśnienia w procesie laminacji, co powoduje ich ugięcie.

Z uwagi na perspektywiczność zagadnienia wytwarzania struktur LTCC z kanałami (systemy mikrofluidyczne dla medycyny oraz ochrony środowiska) oraz wnękami (zastosowania mikrofalowe) rozpoczęto badania mające na celu określenie optymalnego sposobu wypełniania wnęk w wykonywanych strukturach. Istotny jest odpowiedni dobór materiału wypełniającego. Materiał ten musi być na tyle gęsty, aby skutecznie zapobiegać deformacji skrajnych warstw w procesie laminacji, a jednocześnie musi ulec całkowitemu odgazowaniu w procesie wypału struktury, nie powodując jednakże jej zniszczenia (wybuchu). Po przeprowadzonych badaniach za najbardziej obiecujące rozwiązanie uznano zastosowanie alkoholu cetylowego rozpuszczonego w benzynie lakowej. Umożliwiło to poprawne wytworzenie wnęk o szerokości 2,8 mm (rys. 28). Kontynuacja prac nad tym zagadnieniem przewidziana jest w 2011 r.

Porównanie zastosowanych materiałów wypełniających zawiera tab. 2.



Rys. 28. Przekrój wzdłużny przez strukturę filtru (egzemplarz bez metalizacji) otrzymany w wyniku badania metodą mikrotomografii komputerowej. Wnęka lewa jest wykonana poprawnie, wnęki środkowe uległy zniszczeniu (zapadnięcie warstw zewnętrznych), wnęka prawa – ugięcie środkowej warstwy, przy minimalnym ugięciu warstw zewnętrznych, porównywalnym z wnęką lewą

Tabela 2. Porównanie materiałów wypełniających

Wypełniacz	Działanie
Benzyna lakowa	Rozpuszczenie warstwy przewodzącej. Zapadnięcie wnęk w czasie wypału
PMMA	Pęknięcie struktury w czasie wypału
PVA – duże granulki	Pęknięcie struktury w czasie wypału. Deformacje dna wnęk

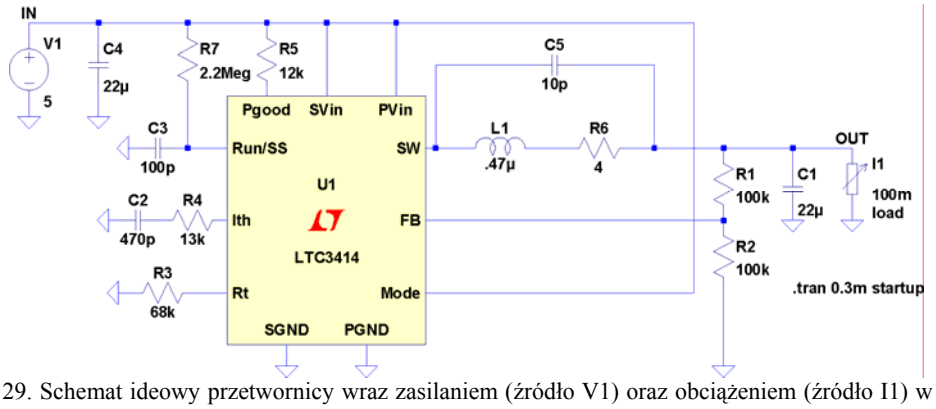
PVA – drobne granulki	Lokalne zapadnięcia wnęk na skutek niedostatecznego upakowania polimeru w kanale
PVB	Laminacja poprawna (brak deformacji). Rozerwanie struktury w czasie wypału
Polistyren + PMMA	Struktura wyposażone w kanały odprowadzające gazy powstające w procesie wypału. Eksplozja w trakcie wypału
Alkohol cetylowy sproszkowany	Deformacje wnęk
Alkohol cetylowy płynny	Struktura wyposażona w kanały odprowadzające gazy powstające w procesie wypału. Zapadnięcie wnęki
Alkohol cetylowy rozpuszczony w benzynie lakowej	Struktura wyposażona w kanały odprowadzające gazy powstające w procesie wypału. Niewielkie deformacje wnęk
PMMA rozpuszczony w benzynie lakowej	Struktura wyposażona w kanały odprowadzające gazy powstające w procesie wypału. Pęknięcia wnęk

Przetwornica DC/DC z elementami zintegrowanymi

Celem projektu było opanowanie technologii wykonywania w technologii LTCC układów elektronicznych integrujących elementy bierne wraz z elementami aktywnymi i biernymi montowanymi w technologii SMD. Jako wymierny cel projektu wybrano realizację zintegrowanej przetwornicy DC/DC małej mocy.

Projekt elektryczny

Projekt elektryczny układu (rys. 29) jest oparty na referencyjnym układzie aplikacyjnym scalonej przetwornicy DC/DC LTC3414. Układ jest skonfigurowany do pracy z napięciem wyjściowym 1,6 V, dla napięć wejściowych z zakresu 3 ÷ 5 V. Jedyną istotną zmianą jest zamodelowanie wykonanej w procesie LTCC cewki jako połączenia indukcyjności L1, rezystancji R6 modelującej rezystancję szeregową cewki i kondensatora C5, modelującego pasożytniczą pojemność cewki L1.



Rys. 29. Schemat ideowy przetwornicy wraz zasilaniem (źródło V1) oraz obciążeniem (źródło I1) w programie LTspice

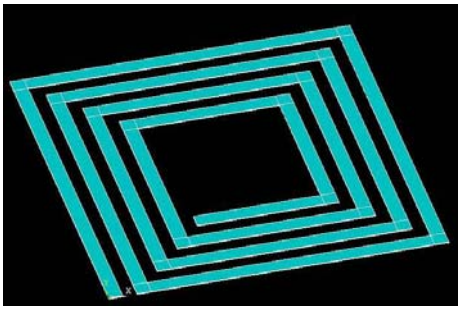
Rezystancja R6 została wyliczona na podstawie rezystancji powierzchniowej pasty przewodzącej DP6142D po wypale, a przewidywana wielkość pojemności C5 została ustalona na podstawie dotychczasowych doświadczeń z wykonywaniem elementów indukcyjnych w technologii LTCC.

Projektowanie zintegrowanego elementu indukcyjnego

Celem zadania było zaprojektowanie wykonanego w technologii LTCC elementu indukcyjnego o indukcyjności 470 nH. Zadanie to sprowadza się do znalezienia odpowiedniej topografii nadruku warstw przewodzących. W tym celu zastosowano symulacje komputerowe metodą elementów skończonych.

Za pomocą pakietu Ansys Multiphysics została zamodelowana cewka przeznaczona do wykonania techniką LTCC. Wykonano symulację dwóch wariantów cewki: jedno- i dwuwarstwowej. Procedura modelowania metodą elementów skończonych obejmuje następujące czynności:

- Stworzenie modelu reprezentującego geometrię jednej lub więcej warstw ścieżek przewodzących oraz ceramiki i powietrza otaczających cewkę. W zastosowanym modelu ścieżki przewodzące mają szerokość 250 µm i grubość 15 µm. Odległość między nimi wynosi 250 µm, liczba zwojów dla jednej warstwy 4. Przeanalizowano zachowanie cewki jednowarstwowej i dwuwarstwowej (rys. 30). Po wykonaniu każdego przebiegu symulacji geometria ścieżek była systematycznie modyfikowana, tak aby otrzymać wyniki maksymalnie zbliżone do założeń projektowych.



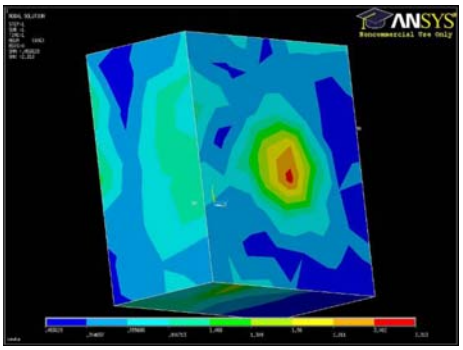
Rys. 30. Widok poglądowy cewki jednowarstwowej

- Zadanie właściwości materiałowych. Założono materiał podłożowy DuPont DP951PT grubości 100 µm (po wypale). Przyjęto katalogowe wartości stałych materiałowych $\varepsilon_r = 7{,}8$ oraz $\mu_r = 1$.
- Stworzenie siatki elementów (meshing). W metodzie elementów skończonych symulowany obiekt jest pokrywany siatką złożoną z trójkątów, a następnie jest rozwiązywany zadany problem (obliczenie wartości pól elektromagnetycznych) w węzłach tej siatki.
- Rozwiązanie zadanego problemu. Symulacje zostały wykonane w środowisku programu ANSYS Multiphysics, na superkomputerze SGI Altix 3700 udostępnionym przez ACK Cyfronet AGH.
- Obróbka wyników. Po obliczeniu rozkładu pola magnetycznego wewnątrz struktury indukcyjność cewki została obliczona na podstawie ilości zmagazynowanej energii według zależności $L = (2E_L)/I^2$.

Po przeanalizowaniu geometrii docelowej otrzymano następujące wartości indukcyjności elementu:

- cewka jednowarstwowa L = 86 nH,
- cewka dwuwarstwowa L = 473 nH.

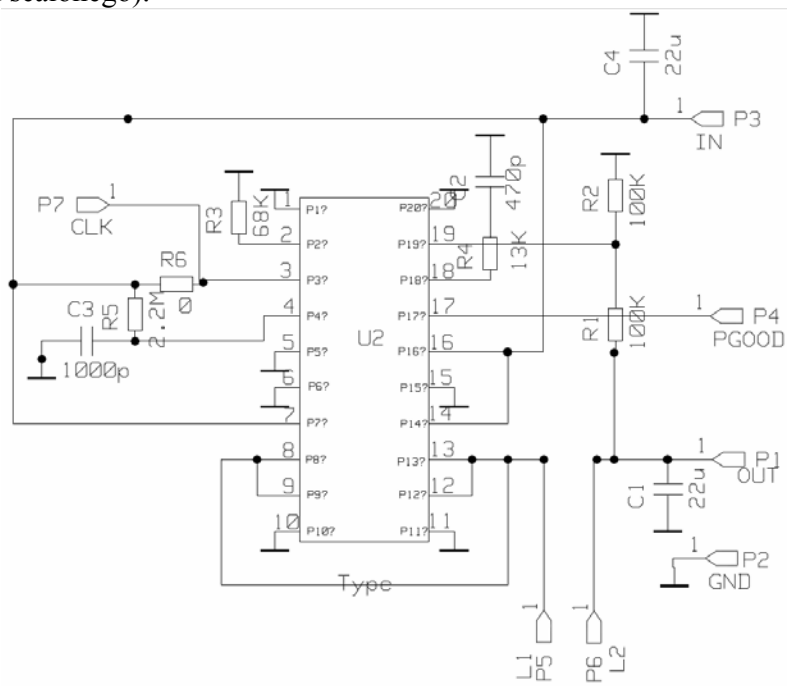
Otrzymane rozkłady pola magnetycznego cewki przestawia rys. 31.



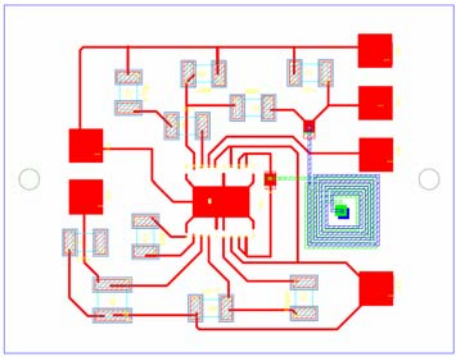
Rys. 31. Natężenie pola magnetycznego cewki

Projekt topografii

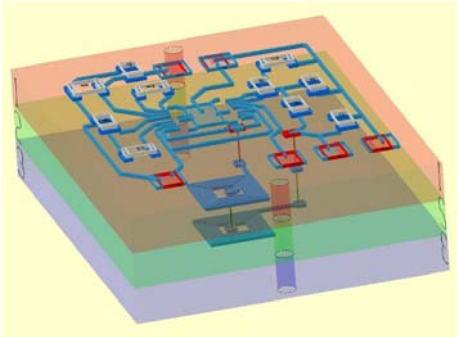
Projekt topografii układu wykonano w środowisku programu Durst HYDE przeznaczonego specjalnie do projektowania struktur LTCC. Zadecydowano o wykonaniu w technologii LTCC jedynie elementu indukcyjnego, natomiast pozostałe elementy bierne, podobnie jak układ scalony, wykorzystują montaż w technologii SMD. Decyzja ta została podyktowana trudnościami z zakupem past rezystywnych przeznaczonych dla technologii LTCC. Element indukcyjny został umieszczony na wewnętrznych warstwach struktury, natomiast elementy SMD umieszczono na warstwie górnej. Rysunek 32 przedstawia schemat elektryczny układu przeniesiony do środowiska Durst HYDE. Na rys. 33 pokazano projekt topologii układu. Widoczne jest przesunięcie zwojów cewki względem siebie w celu zmniejszenia pojemności pasożytniczych. Na rys. 34 przedstawiono trójwymiarowy widok projektu struktury (bez zamontowanego układu scalonego).



Rys. 32. Schemat elektryczny układu. IN – „+” napięcia wejściowego, OUT – „+” napięcia wyjściowego, PGOOD – sygnał wyjściowy informujący o osiągnięciu docelowego reżimu pracy, CLK – opcjonalne wejście zewnętrznego sygnału zegarowego, L1, L2 – porty zintegrowanej cewki



Rys. 33. Projekt topografii układu. Kolor czerwony – warstwa górna, kolor zielony – warstwa środkowa, kolor niebieski – warstwa dolna

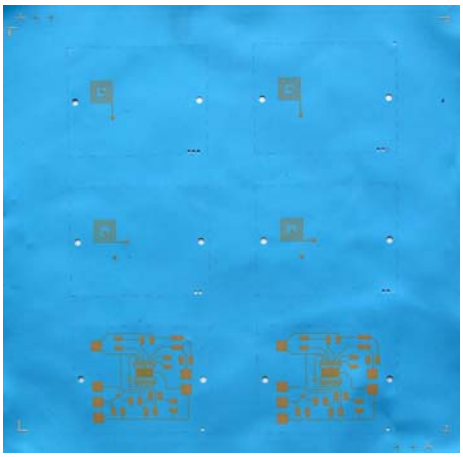


Rys. 34. Trójwymiarowy widok projektu struktury z zamontowanymi elementami biernymi. Grubość taśm zwiększona dla lepszej czytelności.

Realizacja technologiczna

Zgodnie z projektem układ został wykonany na podłożu z taśmy DP 951PT. Z uwagi na skurcz taśmy następujący w procesie wypału (12,7% w kierunku XY) wszystkie wymiary zostały przeskalowane o współczynnik 1,14.

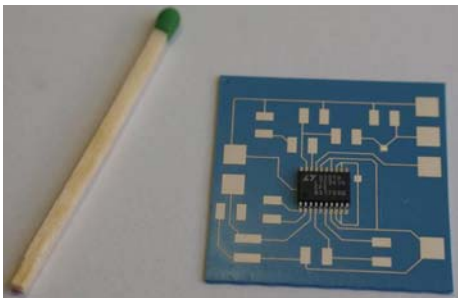
Podłoża oraz otwory wycięto laserem impulsowym UV (λ = 355 nm), pracującym z częstotliwością 10 kHz przy mocy 1,5 W z prędkością przesuwu 10 mm/s. Ścieżki przewodzące nadrukowano przy użyciu precyzyjnej sitodrukarki automatycznej MT-320TVC. Ścieżki przewodzące na warstwach wewnętrznych wykonano ze srebrnej pasty DP 6142D. Na warstwie górnej zastosowano srebrną lutowną pastę przewodzącą ESL 9916. Przejścia między warstwami (via) wypełniono srebrną pastą DP 6141. Rysunek 35 przedstawia wydrukowane wszystkie trzy warstwy przewodzące dla dwóch struktur na jednym podłożu o wymiarach 6 × 6”.



Rys. 35. Zadrukowany arkusz folii. Widoczne przerywane nacięcia laserem, wzdłuż których w następnym kroku nastąpi oddzielenie poszczególnych warstw.

W celu zwiększenia mechanicznej wytrzymałości struktury dodano na spodzie trzy dodatkowe warstwy taśmy, zwiększając całkowitą liczbę warstw do sześciu. Laminowanie wykonano na prasie izostatycznej w temperaturze 70ºC i przy ciśnieniu 21 MPa z czasie 10 min. Wytworzono siedem struktur, z czego w pięciu (próbki 1–5) górna warstwa została nadrukowana pastą ESL9916, a warstwy wewnętrzne pastą DP6142D. Dwie pozostałe struktury zostały w całości wydrukowane jedną pastą, tzn. jedna struktura pastą DP6142D

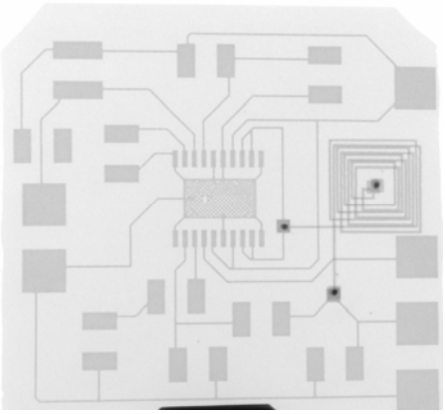
(próbka 6), a druga pastą ESL9916 (próbka 7). Próbki 3–5 zostały uszkodzone w czasie laminacji (pęknięcie worka). Wypału struktury dokonano według standardowego profilu temperaturowego, rekomendowanego przez producenta taśmy. Wypaloną strukturę przedstawiono na rys. 36. Widoczne jest znakomite dopasowanie padów kontaktowych pod układ scalony (por. rys. 33 i 34) z wyprowadzeniami obudowy pomimo skurczu podłoża w trakcie wypalania.



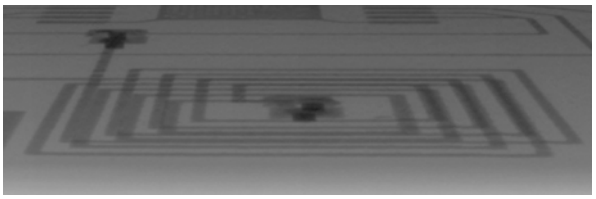
Rys. 36. Wypalona struktura z układem scalonym

Inspekcja rentgenowska

W celu zweryfikowania poprawności wykonania struktury zastosowano obrazowanie rentgenowskie. Wykorzystano mikrotomograf komputerowy XTek Benchtop CT160Xi (Instytut Nafty i Gazu, Kraków). Badanie przeprowadzono na próbce nr 7, wykonanej w całości z pasty ESL9916 i charakteryzującej się obniżoną rezystancją cewki w stosunku do struktur z warstwami wewnętrznymi nadrukowanymi pastą DP6142D. Inspekcja miała na celu stwierdzenie, czy niższa rezystancja jest skutkiem mniejszej rezystancji powierzchniowej pasty, czy też zwarcia na wewnętrznych warstwach struktury. Zdjęcie całości struktury (bez elementów) przedstawia rys. 37. Na rys. 38 pokazano zbliżenie obszaru cewki.



Rys. 37. Zdjęcie rentgenowskie wykonanej struktury



Rys. 38. Zbliżenie obszaru cewki – widok ukośny

Widoczne jest niewielkie przesunięcie względem siebie znajdujących się w środku cewki przejść pomiędzy warstwami 1 i 2 oraz 2–3. Przesunięcie to ma wielkość ok. 1/3 wielkości otaczającego via pola kontaktowego, tak więc nie powoduje przerwania kontaktu elektrycznego. Ponadto, porównując rys. 37 i 38 z rys. 33, można zaobserwować niezgodne z projektem nachodzenie na siebie ścieżek prze-

wodzących z różnych warstw. Oznacza to, że w przypadku badanej struktury miało miejsce przesunięcie względem siebie warstw w procesie składania struktury przed laminacją. Aczkolwiek składanie to jest wykonywane na kołkach przechodzących przez dwa specjalnie wycięte otwory w bokach folii, to jednak z uwagi na elastyczność surowego materiału może nastąpić odkształcenie taśmy skutkujące pokazanymi przesunięciami. Obrazowanie rentgenowskie anomalnej próbki nie wykazało obecności anomalii uniemożliwiających funkcjonowanie układu.

Podsumowanie

Zrealizowane prace badawcze wskazują, że w procesie wytwarzania struktur LTCC opanowano kolejne etapy technologii i konstrukcji. Wprowadzenie technologii wytwarzania precyzyjnych ścieżek przewodzących metodą ablacji laserowej, komputerowego projektowania topografii struktur wielowarstwowych, precyzyjnego pakietowania nadrukowanych folii ceramicznych otwiera drogę do tworzenia mikrofalowych obwodów LTCC. Równocześnie potwierdzono celowość kontynuowania prac w zakresie procesów wytwarzania kanałów i wnęk, które otworzą perspektywę dla wytwarzania struktur mikrofluidalnych.

2.5. Modele, prototypy i wdrożenia

Modele

- ferroelektryczna folia ceramiczna typ PFTPT-1,
- folia ferrytowa typ CF-1,
- folia ferrytowa typ NZCF-1,
- warstwowy kompozytowy element multiferroiczny typ MK-1,
- folia anodowa typ A-1,
- regulator ładowania przeznaczony do badań naukowych i celów dydaktycznych typ RSS-17,
- interfejs typ IRSS-17,
- lampa do doświetlania roślin typ LLDR-01,
- podłoże LTCC z grzejnikiem do czujnika gazu typ CG-7.1,
- przetwornica małej mocy DC/DC typ PD-11.

Prototypy – rezystor hybrydowy typ RH-26.

Wdrożenia

- obudowa ceramiczna detektora PSI3,
- technologia lutowania kondensacyjnego.

3. Uzyskane stopnie naukowe

- Dr Agata Skwarek – stopień doktora uzyskany 7.12.2010 r. na podstawie rozprawy „Analiza występowania wiskerów i zarazy cynowej wpływających na ja-

kość lutów bezołowiowych o wysokiej zawartości cyny" (ITE, promotor dr hab. inż. Andrzej Czerwiński).

4. Współpraca międzynarodowa

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

We współpracy z Budapest University of Technology and Economics (BME) w ramach programu Eurotraining zorganizowano w dniach 14–15.04.2010 r. dwudniowy kurs „Nanotechnology for Electronics" dla środowisk naukowych południowej Polski (Kraków, Rzeszów, Gliwice).

Kontynuowano współpracę z UPB-CETTI w Bukareszcie w zakresie badań elementów wytworzonych technologią LTCC.

Zakład nadal aktywnie uczestniczy w działalności Stowarzyszenia Elektroniki Organicznej (OEA). Pracownicy Zakładu biorą udział w kwartalnych spotkaniach Stowarzyszenia oraz w pracach grup roboczych ds. normalizacji organicznych elementów półprzewodnikowych i opracowywania czujników organicznych.

5. Usługi naukowo-badawcze i produkcja małoseryjna

Za zrealizowane usługi badawcze, laboratoryjne badania wyrobów, produkcję małoseryjną z tytułu kontynuowania wdrożeń uzyskano łącznie przychód w wysokości 716 825 zł, w tym wartość sprzedaży produkcji doświadczalnej (systemy zasilania awaryjnego MSZ, regulatory ładowania dla systemów fotowoltaicznych, inwertery DC/AC) wyniosła 228 156 zł.

Opracowano modele i prototypy oraz zrealizowano usługi badawcze w zakresie inżynierii materiałowej uzyskując przychód w wysokości 150 062 zł.

Za produkcję małoseryjną, realizowaną jako kontynuacja wdrożeń technologii montażu powierzchniowego, wdrożenie technologii wytwarzania grzejników na podłożach elastycznych oraz wdrożenie laryngofonu, uzyskano przychód w wysokości 338 607 zł.

6. Działalność edukacyjna

Pracownicy naukowi Zakładu prowadzą dla studentów Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie zajęcia laboratoryjne w zakresie technologii warstw grubych, technologii montażu powierzchniowego, systemów fotowoltaicznych i technologii LTCC.

Prowadzono praktyki wakacyjne i praktyki dyplomowe dla studentów AGH, Politechniki Wrocławskiej, Śląskiej, Krakowskiej i Warszawskiej.

Konsultowano i prowadzono prace dyplomowe magisterskie w zakresie technologii grubowarstwowej, techniki montażu powierzchniowego, fotowoltaiki i oświetlenia LED.

7. Zakupy aparatury naukowo-badawczej

W 2010 r. zakupiono z dotacji statutowej aparaturę badawczą i technologiczną, niezbędną do doposażenia linii LTCC, wypełniając istniejące luki procesowe.

Zostały zakupione:

- programowana drukarka struktur warstwowych typu ink jet printer o wysokiej rozdzielczości (niewymagająca stosowania sit),
- urządzenie do automatycznej kontroli wizualnej folii ceramicznych LTCC,
- urządzenie do montażu struktur półprzewodnikowych na podłożach ceramicznych,
- profilograf bezstykowy,
- urządzenie do lutowania w fazie gazowej z systemem schładzania kondensatu.

Dzięki zrealizowanym zakupom poszerzone zostały możliwości technologiczne wytwarzania układów LTCC. Możliwe stało się osiąganie wyższej precyzji wytwarzania struktur warstwowych w wyniku wprowadzenia bezpośredniego druku strumieniowego (ink jet printing), zwiększono gęstość upakowania dzięki wprowadzeniu technologii montażu (die bonding) nieobudowanych struktur półprzewodnikowych, udoskonalono system kontroli jakości powierzchni struktur oraz warstw wprowadzając bezstykowe metody badania profilu warstw i komputerowo-optyczną analizę jakości druku, dokładności wykonania otworów (vias) i ich metalizacji. Szczegółową charakterystykę urządzeń przedstawiono w rozdziale „Aparatura naukowo-badawcza zakupiona w 2010 r.”.

Publikacje’2010

[P1] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., RYDOSZ A., MAZIARZ W., MALECHA K.: Laser Micromachined LTCC Gas Sensors. *Elektronika* (złoż. do red.).

[P2] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., RYDOSZ A., MAZIARZ W., MALECHA K.: Laser Micromachined LTCC Gas Sensors. Proc. of the 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P3] CIEŻ M., PTAK J., JAKUBOWSKA M., SŁOMA M.: Influence of Phosphor Grains Sizes on Brightness and Life of Electroluminescent Light Sources. Proc. of the Int. Conf. a. Exhib. for the Organic and Printed Electronics Industry. Frankfurt/M, 31.05–2.06.2010, s. 125–128.

[P4] CIEŻ M., ZARASKA W., PTAK J., PORADA Z., JAKUBOWSKA M., SŁOMA M., MŁOŻNIAK A.: Grubowarstwowe elektroluminescencyjne źródła światła, ich właściwości i zastosowania. *Drukowana elektronika w Polsce*. Red. M. Jakubowska, J. Sitek. ITR, Warszawa 2010, s. 123–132.

[P5] CIEŻ M., ZARASKA W., PTAK J., PORADA Z., JAKUBOWSKA M., SŁOMA M., MŁOŻNIAK A.: Grubowarstwowe elektroluminescencyjne źródła światła, ich właściwości i zastosowania. Mat. konf. I Konf. Nauk.-Techn. „Organiczna, drukowana i elastyczna elektronika". Warszawa, 22–23.04.2010 (złoż. do red.).

[P6] DZIURDZIA B., KENIG T., WINIARSKA B., ZARASKA K., BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J.: Characterisation of Vias Formed in LTCC with a UV Diode-Pumped Solid State Laser. Proc. of the 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P7] DZIURDZIA B., MAGOŃSKI Z., SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., KOPROWSKI J.: Engraved Microchannels as Fuel Distributors for Solid Oxide Fuel Cells. Proc. of the 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P8] GRZESIAK W.: Implementacja techniki MPPT w regulatorach ładowania autonomicznych systemów fotowoltaicznych. *Prz. Elektrotechn.* 2010 vol. 86 nr 11 s. 187–189.

[P9] GRZESIAK W.: Implementacja techniki MPPT w regulatorach ładowania autonomicznych systemów fotowoltaicznych. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 322–327.

[P10] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., CHAMIOŁO J.: Wysokosprawne układy do zasilania SSL LED dla potrzeb autonomicznych instalacji PV. *Prz. Elektrotechn.* 2010 vol. 86 nr 11 s. 184–186.

[P11] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., CHAMIOŁO J.: Wysokosprawne układy do zasilania SSL LED dla potrzeb autonomicznych instalacji PV. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 291–296.

[P12] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., CHAMIOŁO J., PISARKIEWICZ T., KOPROWSKI J., JAŚKIEWICZ M.: Design of High Efficiency SSL LED Luminaires Supplied by Stand-Alone Photovoltaic Installations. Proc. of the 10th Conf. „Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010, s. 1–4.

[P13] GRZESIAK W., CHAMIOŁO J.: Energooszczędne innowacyjne technologie oświetleniowe. *Prz. Elektrotechn*. 2010 vol. 85 nr 6 s. 73–78.

[P14] GRZESIAK W., CHAMIOŁO J.: Kryteria doboru komponentów wysokosprawnych autonomicznych instalacji oświetleniowych i sygnalizacyjnych wykorzystujących technologię SSL LED oraz zasilanie z systemów PV. Mat. konf. I Konf. Nauk.-Techn. „Energooszczędne innowacyjne technologie oświetleniowe". Łódź, 4–5.03.2010, s. 81–93.

[P15] GRZESIAK W., RADZIEMSKA E.: Technika MPPT sposobem maksymalizacji wykorzystania energii elektrycznej generowanej przez moduły fotowoltaiczne. *Elektronika* 2010 vol. LI nr 5 s. 42–49.

[P16] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Method of Utilizing Mechanically Damaged Silicon Solar Cells. Proc. of the 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera Valencia, Hiszpania, 6–10.09.2010, s. 4402–4404.

[P17] GRZESIAK W., CIEŻ M., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Autonomous Hybrid Systems PV/Fuels Cells. Proc. of the 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera Valencja, Hiszpania, 6–10.09.2010, s. 4405–4408.

[P18] GUZDEK P., KULAWIK J., ZARASKA K., BIEŃKOWSKI A.: NiZnCu Ferrite Applied for LTCC Microinductor. *J. of Magnetism a. Magnetic Mater.* 2010 vol. 322 nr 3 s. 2897–2901.

[P19] GUZDEK P., PSZCZOŁA J., STOCH P., STOCH A.: Mössbauer Effect, Magnetic and Electrical Properties Studies of $(Y_{1-x}Gd_x)(Fe_{0.7}Co_{0.3})_2$ Intermetallics. Int. Conf. on the Applications of the Mössbauer Effect. *J. of Phys.: Conf. Ser*. 2010 t. 217 s. 012130-4.

[P20] JAKUBOWSKA M., SŁOMA M., MŁOŻNIAK A., CIEŻ M., ZARASKA W.: Elektroluminescencyjne wielkopowierzchniowe drukowane źródła światła. *Drukowana elektronika w Polsce.* Red. M. Jakubowska, J. Sitek, ITR, Warszawa, 2010, s. 133–143.

[P21] KLIMIEC E., STOBIERSKI L., NOWAK S., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S.: Electric Properties of Monophase Polycrystalline Sinters SiC, B_4C, TiC and Their Composites as Non-Inductive Volume Resistors. *J. of Electrocer.* (złoż. do red.).

[P22] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S.: Badania właściwości piezoelektrycznych folii polimerowych pod kątem ich zastosowania na czujniki nacisku do systemów pomiarowych wad postawy i pulsacji krwi. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 749–754.

[P23] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S.: Investigation of Piezoelectric Properties of Polymer Films and Perspective of Their Application as Pressure Sensors to Measurement Systems of Faulty Posture and Blood Pulsation. *Metrol. a. Measur. Syst.* (złoż. do red.).

[P24] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S., MACHNIK M.: The Investigation of Electret Thin Film Durability in Polypropylene PP and Polyvinylidene Fluoride PVDF at an Angle of Their Application as Pressure Sensors. Proc. of the 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010, s. 205.

[P25] KLIMIEC E., ZARASKA K., ZARASKA W.: Micropower Source Based on Piezoelectric Polymers. *Adv. in Appl. Ceram.* 2010 vol. 109 nr 3 s. 152–155.

[P26] KUCZYŃSKI S.: Jak stoimy energetycznie? Leżymy.... *Energia Gigawat* 2010 nr 3 s. 37–40.

[P27] KULAWIK J., GUZDEK P., SZWAGIERCZAK D., STOCH A.: Dielectric and Magnetic Properties of Bulk and Layered Tape Cast $CoFe_2O_4$-$Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$ Composites. *Comp. Struct.* 2010 vol. 92 s. 2153–2158.

[P28] KULAWIK J., GUZDEK P., SZWAGIERCZAK D.: Microstructure, Magnetic and Dielectric Properties of $CoFe_2O_4$-$Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-$PbTiO_3$ Composites. 12th Int. Ceramics Congr. Part F. *Advanc. in Sci. a. Technol.* 2010 t. 7 s. 158–163.

[P29] ŁUCZAK K., GRZESIAK W.: Long Term Degradation and Annealing Patterns of Amorphous Silicon Solar Modules at the Work Site in a Warm Climate. Proc. of the 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera , Hiszpania, 6–10.09.2010, s. 4276–4278.

[P30] ŁUKASIK A.: Polimerowe nanokompozyty resystywne z nanorurkami węglowymi. Mat. konf. I Konf. Nauk.-Techn. „Organiczna, drukowana i elastyczna elektronika". Warszawa, 22–23.04.2010 (złoż. do red.).

[P31] ŁUKASIK A.: Polimerowe nanokompozyty rezystywne z nanorurkami węglowymi. *Drukowana elektronika w Polsce*. Red. M. Jakubowska, J. Sitek. ITR, Warszawa 2010, s. 53–67.

[P32] MROCZKOWSKI M., CIEŻ M., KALENIK J.: Studies of Rejuvenation of Electroluminescent Thick Film Structures. Proc. of the 10th Conf. „Electron Technology ELTE 2010. Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P33] PORADA Z., CIEŻ M.: Model matematyczny opisujący wpływ procesów starzeniowych na parametry elektroluminescencyjne struktur grubowarstwowych. *Elektronika* 2010 vol. LI nr 6 s. 123–125.

[P34] PORADA Z., CIEŻ M.: Procesy starzeniowe i ich wpływ na parametry świetlne warstw elektroluminescencyjnych. Mat. konf. IV Kraj. Konf. Nauk.-Techn. „Energooszczędne oświetlenie w miastach i gminach". Kraków, 20.10.2010, s. 107–114.

[P35] PRUSZOWSKI Z., CIEŻ M.: The Influence of Electroless Metallization Process Parameters on Basic Electric Properties of Ni-P Alloy. *Microelectron. Reliab*. (złoż. do red.).

[P36] RADZIEMSKA E., PIEKARSKA K., GRZESIAK W.: Badania eksperymentalne wpływu częściowego zacienienia modułu fotowoltaicznego na generowaną moc elektryczną. *Elektronika* 2010 vol. LI nr 6 s. 175–178.

[P37] RADZIEMSKA E., PIEKARSKA K., GRZESIAK W.: Badania eksperymentalne wpływu częściowego zacienienia modułu fotowoltaicznego na generowaną moc elektryczną. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 285–290.

[P38] SKOCZOWSKI A. M., CZYCZYŁO-MYSZA I., SKWAREK A., PILARSKI J., GRZESIAK W., NOWAK S.: Impact of Light Spectral Composition and Ozone Fumigation on Chlorophyll Content Changes and Optical Properties of Broccoli Leaves. *Zesz. Probl. Postępów Nauk Roln.* 2010 nr 545 s. 357–373.

[P39] SKWAREK A., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., RATAJCZAK J., WITEK K.: Tin Pest and Corrosion on Tin-Rich Lead-Free Alloys Investigated by Dedicated Electron Microscopy Methods. *J. of Alloys a. Comp.* (złoż. do red.).

[P40] SKWAREK A., PŁUSKA M., WITEK K., CZERWIŃSKI A., FILIPOWSKI W.: Analiza występowania wiskerów na powierzchni wysokocynowych stopów lutowniczych poddanych działaniu skrajnych warunków środowiskowych. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 735–740.

[P41] 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. *J. of Alloys a. Comp.* (złoż. do red.).

[P42] SKWAREK A., WITEK K., PŁUSKA M., CZERWIŃSKI A., FILIPOWSKI W.: Analiza występowania wiskerów na powierzchni wysokocynowych stopów lutowniczych poddanych działaniu skrajnych warunków środowiskowych. *Elektronika* 2010 vol. LI nr 9 s. 103–106.

[P43] STOCH P., CIECIŃSKA M., STOCH A.: Wykorzystanie metody MD w projektowaniu procesu witryfikacji odpadów radioaktywnych. *Mater. Ceram*. 2010 vol. 62 nr 1 s. 3–13.

[P44] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.7}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.3}Pb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ Multiferroic. *Acta Phys. Pol. A* (złoż. do red.).

[P45] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J., ZACHARIASZ P., ZIELIŃSKI P.: Magnetic and Electrical Properties of $_{0.7}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.}3Pb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ Multiferroic. *Ceram. Trans*. (złoż. do red.).

[P46] STOCH A., ZACHARIASZ P., STOCH P., KULAWIK J., MAURIN J.: Hyperfine Interactions and Electrical Properties of $_{0.5}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_3$-$_{0.5}Pb(Fe_{0.5}Nb_{0.5})O_3$ Multiferroic. Int. Conf. on the Applications of the Mössbauer Effect. *J. of Phys.: Conf. Ser*. 2010 t. 217 s. 012135-4.

[P47] STOCH A., ZACHARIASZ P., STOCH P., KULAWIK J., MAURIN J.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.5}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.5}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. *Acta Phys. Pol. A* (złoż. do red.).

[P48] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of $_{0.1}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.9}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. *Mater. Sci. a. Eng. A* (złoż. do druku).

[P49] STOCH P., STOCH A., KULAWIK J., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.1}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.9}Pb(_{Fe2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. *Mater. Sci. a. Eng. A* (złoż. do druku).

[P50] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Preparation and Characterization of Dielectric Behavior of $A_{2/3}Cu_3Ti_4$ (A=Nd, Sm, Gd, Dy) Ceramics. 12th Int. Ceramics Congr. Part F. *Advanc. in Sci. a. Technol.* 2010 t. 7 s. 28–33.

[P51] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Dielectric Properties of High Permittivity Ceramics Based on $Dy_{2/3}CuTa_4O_{12}$. *J. of Alloys a. Comp.* 2010 vol. 491 s. 465–471.

[P52] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GROEGER B., PRUSZOWSKI Z.: Otrzymywanie i charakterytyka komponentów ogniwa tlenkowego Ni-YSZ/YSZ/$Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$-YSZ. *Elektronika* 2010 vol. LI nr 10 s. 15–18.

[P53] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GROEGER B., PRUSZOWSKI Z.: Otrzymywanie i charakterytyka komponentów ogniwa tlenkowego Ni-YSZ/YSZ/$Sr_{0.8}Ce_{0.1}La_{0.1}MnO_{3-\delta}$-YSZ. Mat. konf. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010, s. 75–80.

[P54] 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. Wiedeń, Austria, 6–9.04.2010 (złoż. do red.)

[P55] WĘGRZECKI M., WIELUNSKI M., SARNECKI J., BAR J., BUDZYŃSKI T., CIEŻ M., GRABIEC P., GRODECKI R., KULAWIK J., LIPIŃSKI D., PANAS A., RUHM W., SŁYSZ W., WAHL W., WĘGRZECKA I., WITEK K., ZABOROWSKI M.: Sensorors for Neutron Dosimeter. Proc. of the 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P56] WĘGRZECKI M., WIELUNSKI M., SARNECKI J., BAR J., BUDZYŃSKI T., CIEŻ M., GRABIEC P., GRODECKI R., GROEGER B., GRUBER E., HAIDER B., KARINDA F., KULAWIK J., LIPIŃSKI D., PANAS A., RUHM W., SŁYSZ W., WĘGRZECKA I., ZABOROWSKI M.: The Detector of alpha Particles for Radon Exposimeter. Proc. of the 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P57] WĘGRZECKI M., YAKUSHEV A., BAR J., BUDZYŃSKI T., GORSHKOV A., GRABIEC P., GRODECKI R., KŁOS H., KULAWIK J., PANAS A., SŁYSZ W., WĘGRZECKA I., ZABOROWSKI M.: Strip Detectors for Focal Plane Detector Box. Proc. of the 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P58] ZARASKA K., BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., DOHNALIK M., GRUSZCZYŃSKI S., WINCZA K.: Application of Computed Microtomography for 3D Imaging of LTCC Structures. Proc. of the 34th Int. Microelectronics a. Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (złoż. do red.).

[P59] ZARASKA K., CEBULA J., BIEŃKOWSKI A.: Application of High Resolution X-Ray Imaging for Inspection of LTCC Vias. Proc. of the Second ReCIMiCo Workshop. Nowy Sad, Serbia, 5–6.03.2010, s. 10–15.

Prezentacje konferencyjne'2010

[K1] BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., ZARASKA K., RYDOSZ A., MAZIARZ W., MALECHA K.: Laser Micromachined LTCC Gas Sensors. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K2] CIEŻ M., ZARASKA W., PTAK J., PORADA Z., JAKUBOWSKA M., SŁOMA M., MŁOŻNIAK A.: Grubowarstwowe elektroluminescencyjne źródła światła, ich właściwości i zastosowania. I Konf. Nauk.-Tech. „Organiczna, drukowana i elastyczna elektronika". Warszawa, 22–23.04.2010 (ref.).

[K3] DZIURDZIA B., KENIG T., WINIARSKA B., ZARASKA K., BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J.: Characterisation of Vias Formed in LTCC with a UV Diode-Pumped Solid State Laser. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K4] DZIURDZIA B., MAGOŃSKI Z., SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., KOPROWSKI J.: Engraved Microchannels as Fuel Distributors for Solid Oxide Fuel Cells. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K5] GRZESIAK W.: Implementacja techniki MPPT w regulatorach ładowania autonomicznych systemów fotowoltaicznych. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 (plakat, kom.).

[K6] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., CHAMIOŁO J.: Wysokosprawne układy do zasilania SSL LED dla potrzeb autonomicznych instalacji PV. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 (plakat, kom.).

[K7] GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Method of Utilizing Mechanically Damaged Silicon Solar Cells. 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. a. Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera , Hiszpania, 6–10.09.2010 (plakat).

[K8] GRZESIAK W., CHAMIOŁO J.: Kryteria doboru komponentów wysokosprawnych autonomicznych instalacji oświetleniowych i sygnalizacyjnych wykorzystujących technologię SSL LED oraz zasilanie z systemów PV. I Konf. Nauk.-Techn. „Energooszczędne innowacyjne technologie oświetleniowe". Łódź, 4–5.03.2010 (ref.).

[K9] GRZESIAK W., CIEŻ M., MAJ T., CHAMIOŁO J., PISARKIEWICZ T., KOPROWSKI J., JAŚKIEWICZ M.: Design of High Efficiency SSL LED Luminaires Supplied by Stand-Alone Photovoltaic Installations. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat, kom.).

[K10] GRZESIAK W., CIEŻ M., RADZIEMSKA E., PISARKIEWICZ T.: Autonomous Hybrid Systems PV/Fuels Cells. 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. a. Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera , Hiszpania, 6–10.09.2010 (plakat, kom.).

[K11] GUZDEK P.: Magnetoelectric Effect in NiZnCu - PFT Relaxor Structure. ELECTROCERAMICS XII. Trondheim, Szwecja, 13–16.06.2010 (plakat).

[K12] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S.: Badania właściwości piezoelektrycznych folii polimerowych pod kątem ich zastosowania na czujniki nacisku do systemów pomiarowych wad postawy i pulsacji krwi. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 (plakat).

[K13] KLIMIEC E., ZARASKA W., KUCZYŃSKI S., MACHNIK M.: The Investigation of Electret Thin Film Durability in Polypropylene PP and Polyvinylidene Fluoride PVDF at an Angle of Their Application as Pressure Sensors. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K14] KULAWIK J., GUZDEK P., SZWAGIERCZAK D.: Microstructure, Magnetic and Dielectric Properties of Co-Fe_2O_4-$Pb(Fe_{1/2}Ta_{1/2})O_3$-$PbTiO_3$ Composites. 12th Int. Ceramics Congr. CIMTEC 2010. Montecatini Terme, Włochy, 6–18.06.2010 (plakat).

[K15] KULAWIK J., GUZDEK P., SZWAGIERCZAK D., STOCH A.: Characterization of Bulk and Layered Multiferroics Based on Cobalt Ferrite-Lead Iron Niobate Composites. ELECTROCERAMICS XII. Trondheim, Szwecja, 13–16.06.2010 (plakat).

[K16] ŁUCZAK K., GRZESIAK W.: Long Term Degradation and Annealing Patterns of Amorphous Silicon Solar Modules at the Work Site in a Warm Climate. 25th Europ. Photovoltaic Solar Energy Conf. a. Exhib. and 5th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. Fiera , Hiszpania, 6–10.09.2010 (plakat, kom.).

[K17] ŁUKASIK A.: Polimerowe nanokompozyty resystywne z nanorurkami węglowymi. Mat. konf. I Konf. Nauk.-Techn. „Organiczna, drukowana i elastyczna elektronika". Warszawa, 22–23.04.2010 (ref.)

[K18] PORADA Z., CIEŻ M.: Procesy starzeniowe i ich wpływ na parametry świetlne warstw elektroluminescencyjnych. I Konf. Nauk.-Techn. „Energooszczędne innowacyjne technologie oświetleniowe". Łódź, 4–5.03.2010 (ref.).

[K19] PORADA Z., CIEŻ M.: Model matematyczny opisujący wpływ procesów starzeniowych na parametry elektroluminescencyjne struktur grubowarstwowych. XI Konf. Nauk. „Czujniki optoelektroniczne i elektroniczne". Nałęczów, 20–23.06.2010 (ref.).

[K20] RADZIEMSKA E., PIEKARSKA K., GRZESIAK W.: Badania eksperymentalne wpływu częściowego zacienienia modułu fotowoltaicznego na generowaną moc optyczną. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 (plakat, kom.).

[K21] SKWAREK A., PŁUSKA M., WITEK K., CZERWIŃSKI A., FILIPOWSKI W.: Analiza występowania wiskerów na powierzchni wysokocynowych stopów lutowniczych poddanych działaniu skrajnych warunków środowiskowych. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 ().

[K22] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Magnetic and Electrical Properties of $_{0,7}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO_3$-$_{0,3}Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})O_3$. Multiferroic. Materials Science & Technology 2010 Konf. & Exh. Houston, USA, 17–21.10.2010 (plakat).

[K23] STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., ZACHARIASZ P., MAURIN J., ZIELIŃSKI P.: Efekt Mössbauera i właściwości magnetyczne $_{0,7}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO_3$-$_{0,3}Pb(Fe_{0,5}Nb_{0,5})O_3$. Ogólnopol. Sem. Spektroskopii Mössbauerowskiej. Warszawa, 18–21.06.2010 (ref.).

[K24] STOCH P., STOCH A., KULAWIK J., MAURIN J., ZACHARIASZ P.: Structural and Mössbauer Effect Studies of $_{0.1}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.9}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. 3rd Int. Congr. on Ceramics. Osaka, Japonia, 14–18.11.2010 (plakat).

[K25] STOCH A., STOCH P., KULAWIK J., ZIELIŃSKI P., MAURIN J.: Magnetoelectric Properties of $_{0.1}Bi_{0.95}Dy_{0.05}FeO_{3-0.9}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$ Multiferroic. 3rd Int. Congr. on Ceramics. Osaka, Japonia, 14–18.11.2010 (plakat).

[K26] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J.: Preparation and Characterization of Dielectric Behavior of $A_{2/3}Cu_3Ti_4O_{12}$ (A=Nd, Sm, Gd, Dy) Ceramics. 12th Int. Ceramics Congr. CIMTEC 2010. Montecatini Terme, Włochy, 6–18.06.2010 (plakat).

[K27] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GROEGER B., PRUSZOWSKI Z.: Otrzymywanie i charakterystyka komponentów ogniwa tlenkowego Ni-YSZ/YSZ/$Sr_{0,8}Ce_{0,1}La_{0,1}MnO_{3-\delta}$-YSZ. IX Kraj. Konf. Elektroniki. Darłówko Wschodnie, 30.05–2.06.2010 (plakat).

[K28] SZWAGIERCZAK D., KULAWIK J., GUZDEK P., GROEGER B.: Multiferroic Cobalt Ferrite-Relaxor Composites Prepared by Tape Casting. EUREKA-IPCTECH Kick-Off Meet. Wiedeń, Austria, 6–9.04.2010 (ref.).

[K29] WĘGRZECKI M., WIELUNSKI M., SARNECKI J., BAR J., BUDZYŃSKI T., CIEŻ M., GRABIEC P., GRODECKI R., KULAWIK J., LIPIŃSKI D., PANAS A., RUHM W., SŁYSZ W., WAHL W., WĘGRZECKA I., WITEK K., ZABOROWSKI M.: Sensorors for Neutron Dosimeter. 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K30] WĘGRZECKI M., WIELUNSKI M., SARNECKI J., BAR J., BUDZYŃSKI T., CIEŻ M., GRABIEC P., GRODECKI R., GROEGER B., GRUBER E., HAIDER B., KARINDA F., KULAWIK J., LIPIŃSKI D., PANAS A., RUHM W., SŁYSZ W., WĘGRZECKA I., ZABOROWSKI M.: The Detector of alpha Particles for Radon Exposimeter. 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K31] WĘGRZECKI M., YAKUSHEV A., BAR J., BUDZYŃSKI T., GORSHKOV A., GRABIEC P., GRODECKI R., KŁOS H., KULAWIK J., PANAS A., SŁYSZ W., WĘGRZECKA I., ZABOROWSKI M.: Strip Detectors for Focal Plane Detector Box. 10th Conf. "Electron Technology ELTE 2010". Wrocław, 22–25.09.2010 (ref.).

[K32] ZACHARIASZ P., STOCH A., KULAWIK J., STOCH P., MAURIN J.: Oddziaływania nadsubtelne i właściwości elektryczne $_{0,5}Bi_{0,95}Dy_{0,05}FeO_3$-$_{0,5}Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3$. Ogólnopol. Sem. Spektroskopii Mössbauerowskiej. Warszawa, 18–21.06.2010 (ref.).

[K33] ZARASKA K., BIEŃKOWSKI A., GAUDYN J., DOHNALIK M., GRUSZCZYŃSKI S., WINCZA K.: Application of Computed Microtomography for 3D Imaging of LTCC Structure. 34th Int. Microelectronics and Packacking IMAPS-CPMT Poland Conf. Wrocław, 22–25.09.2010 (plakat).

[K34] ZARASKA K., CEBULA J., BIEŃKOWSKI A.: Application of High Resolution X-Ray Imaging for Inspection of LTCC Vias. Second ReCIMiCo Workshop. Nowy Sad, Serbia, 5–6.03.2010 (plakat).

Patenty'2010

[PA1] KLUGMANN-RADZIEMSKA E., GRZESIAK W., BIEŃKOWSKI A.: Sposób otrzymywania modułów fotowoltaicznych z uszkodzonych mechanicznie płytek krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Zgł. pat. nr P.392345 z dn. 9.09.2010.