

ZASTOSOWANIE KLEJÓW PRZEWODZĄCYCH W MIKROMONTAŻU ELEKTRONICZNYM JAKO ALTERNATYWY DO POŁĄCZEŃ LUTOWANYCH

Marcin Słoma¹, Małgorzata Jakubowska², Ryszard Jezior¹

Artykuł zawiera analizę istniejących rozwiązań zastosowania klejów przewodzących w technologii montażu układów elektronicznych. Celem jego jest ukazanie zastosowań kompozytów przewodzących w montażu mikroelektronicznym, jako alternatywy do połączeń lutowanych. Dotychczas stosowane lutowia PbSn zawierające ołów są obecnie wypierane z montażu elektronicznego wskutek obowiązywania dyrektywy RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*), wykluczającej stosowanie ołowiu, kadmu, rtęci i sześciowartościowego chromu w podzespołach elektronicznych [1]. Nowe, bezolowiowe lutowia wymagają lutowania w wyższych temperaturach, co powoduje zwiększenie narażenia montowanych elementów. Proponowane przez autorów zastosowanie klejów przewodzących pozwoli na uniknięcie tego negatywnego zjawiska.

Przedstawiono opis i wyniki badań własnych, mających na celu porównanie parametrów elektrycznych i mechanicznych złącz wykonanych z zastosowaniem klejów przewodzących ze złączami wykonanymi tradycyjnymi metodami z zastosowaniem lutowia PbSn lub lutowia bezolowiowego. Zaproponowana porównawcza metoda pomiaru parametrów elektrycznych i mechanicznych mikropołączeń pozwala jednoznacznie ocenić stopień przydatności klejów przewodzących w technologii montażu układów elektronicznych z kontaktami ukrytymi typu Flip-Chip.

1. WSTĘP

Substancje adhezyjne w montażu elektronicznym znalazły szerokie zastosowanie już od początku istnienia tej dziedziny przemysłu [2]. Stosuje się je zarówno jako materiały służące w montażu mechanicznym, głównie kleje nieprzewodzące, oraz jako substancje montażu elektronicznego. W pierwszym zastosowaniu, kleje muszą charakteryzować się dobrą wytrzymałością na czynniki mechaniczne oraz temperaturowe, a także spełniać wszystkie dodatkowo zakładane parametry, np. być

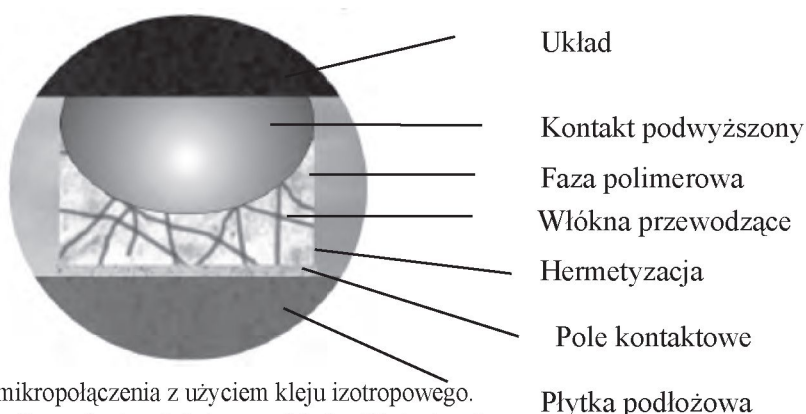
¹ Politechnika Warszawska, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. Św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa

² Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa, e-mail: maljakub@itme.edu.pl

odporne na warunki środowiskowe. W drugim przypadku substancja adhezyjna poza właściwościami mechanicznymi musi przede wszystkim przewodzić sygnał elektryczny. Tą własność posiadają adhezyjne substancje przewodzące zwane również organicznymi kompozytami przewodzącymi z fazą *in-vitro* [3-4]. Faza funkcjonalna elektroprowadząca złożona ze struktur węglowych lub związków metalicznych o odpowiednim składzie chemicznym, kształcie oraz wielkości, zależnych od oczekiwanych parametrów, zapewnia znaczne zmniejszenie rezystancji kleju, a co za tym idzie zwiększenie przewodności, do poziomu porównywalnego z przewodnictwem domieszkowanego krzemu, a nawet słabiej przewodzących metali [3-5]. Częsteczki metaliczne wykonywane są z takich pierwiastków jak złoto, platyna, srebro, nikiel, oraz pallad lub z ich stopów, a rzadziej z miedzi czy węgla (grafit, sadza), choć ostatnio dość duże zastosowanie znajdują nanostruktury węgla tj. fulereny i nanorurki. Kształt cząstek fazy elektroprowadzącej jest bardzo zróżnicowany. Są to najczęściej kulki, łuski, włókna, itp. Rozmiary cząstek także są różne; od wymiarów submikronowych do dziesiątek lub setek mikrometrów. Zagęszczenie cząstek jest w granicach 30% objętości substancji klejącej i jest determinowane głównie przez granicę perkolacji, czyli występowania ścieżek złożonych ze stykających się cząstek zapewniających przewodność elektryczną.

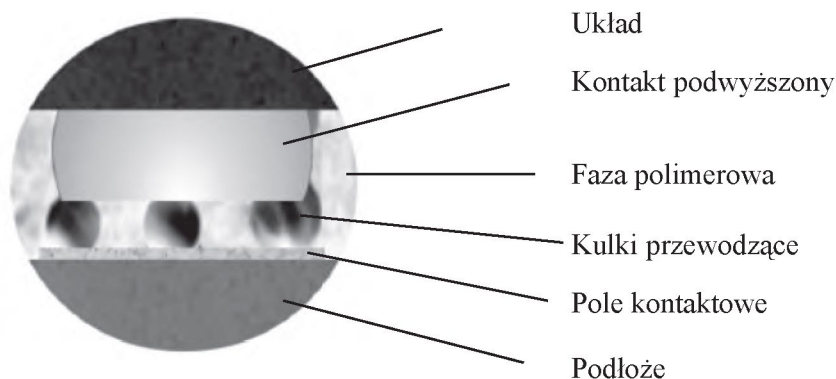
Kleje elektroprowadzące można podzielić na dwie zasadnicze grupy, różniące się od siebie sposobem przewodnictwa:

- Kleje izotropowe, które posiadają własność przewodzenia impulsów elektrycznych w każdej płaszczyźnie geometrycznej. Cząstki przewodzące dodane do osnowy polimerowej mają najczęściej kształt kulek, łusek lub włókien o rozmiarach od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów. Wypełnienie objętościowe na poziomie 10 - 30% (zależnie od kształtu cząstek wypełniacza) zapewnia przewodnictwo elektryczne. Odpowiedni kształt, wielkość i zagęszczenie powodują powstawanie ścieżek przewodnictwa elektrycznego na stykach ziaren oraz występowanie efektu tunelowania poprzez dielektryk pomiędzy cząsteczkami (Rys. 1).



Rys. 1. Budowa mikropołączenia z użyciem kleju izotropowego.
Fig. 1. Cross section of microjoint assembled with isotropic conductive adhesive.

- Kleje anizotropowe, które podobnie jak poprzednio omawiane kleje izotropowe posiadają własność przewodnictwa elektrycznego, z tą jednak różnicą, że przewodzenie odbywa się prostopadle do ściśle określonej jednej z płaszczyzn geometrycznych. Efekt ten uzyskiwany jest przez odpowiednie dobranie wymiarów, kształtu oraz zagęszczenia cząstek przewodzących w medium dielektrycznym. Cząstki mają najczęściej kształt kulisty, o średnicy nieprzekraczającej 10 μm . Kluczową własnością zapewniającą przewodnictwo elektryczne w zadanym kierunku, jest dobór zagęszczenia cząsteczek. Jest ono znacznie mniejsze niż w przypadku klejów izotropowych i wynosi 5 - 10% objętości substancji. Można przyjąć, że kleje anizotropowe są substancjami izolującymi elektrycznie. Klej nakładany pomiędzy dwa końce obwodu elektrycznego (np. pomiędzy pole kontaktowe na obwodzie drukowanym a kontakt na układzie elektronicznym) jest odpowiednio ściskany w taki sposób, aby zawarte w nim cząsteczki miały całkowity kontakt mechaniczny z obiema powierzchniami łączonymi. Jest to zapewniane do tego stopnia, że cząstki dosłownie wbijają się w obie powierzchnie, przez co uzyskuje się pełny kontakt mechaniczny oraz kontakt elektryczny. Ponieważ kulki przewodzące powinny się w znacznym stopniu odkształcić, często stosuje się kulki polimerowe pokryte cienką warstwą metalu. Zmniejsza to jednak przewodność takiego kleju, lecz powstałe w ten sposób połączenie jest bardziej niezawodne. W pozostałych kierunkach zapewniona jest izolacja elektryczna, gdyż zagęszczenie cząstek jest na tyle małe, aby nie nastąpiło ich grupowanie w ścieżki przewodnictwa (Rys. 2).



Rys. 2. Budowa mikrołączenia z użyciem kleju anizotropowego.

Fig. 2. Cross section of microjoint assembled with anisotropic conductive adhesive.

Oprócz klejów w postaci ciekłej występują również taśmy klejące zdolne do przewodzenia impulsów elektrycznych. W mikromontażu układów typu Flip-Chip są to głównie taśmy anizotropowe. Materiał ten nakładany jest na podłoże, a następnie

montuje się na nim układ elektroniczny. Zasada tworzenia kanałów przewodzących jest identyczna jak w przypadku klejów anizotropowych w postaci płynnej. Najczęściej stosowanymi cząstkami metalicznymi są kulki srebrne, niklowe, złote, szklane, pokryte niklem lub srebrem oraz bardzo miękkie kulki polimerowe pokryte metalami. Każdy z tych rodzajów wypełnienia ma swoje zastosowania. Kulki miękkie (złote, polimerowe) stosowane są na podłoża twarde (szklane, ceramiczne), a kulki twarde (szklane powlekane metalami, srebrne, niklowe) na podłoża miękkie (FRx, elastyczne). Podstawową zaletą taśm anizotropowych nad klejami anizotropowymi jest możliwość umiejscowienia w przestrzeni elementów metalicznych, co umożliwia ujednorodnienie zagęszczenia we wszystkich płaszczyznach taśmy. W przypadku klejów płynnych istnieje skończone prawdopodobieństwo powstawania aglomeracji cząstek fazy funkcjonalnej co może prowadzić do powstawania połączeń w nieplanowanych kierunkach. W przypadku taśm izotropowych materiał w postaci taśmy klejącej domieszkowany jest wypełniaczem metalicznym w formie drobnych włókien jednorodnie rozmieszczonych w objętości polimeru. Zjawisko przewodnictwa występuje na takich samych warunkach jak w kleju w postaci płynnej. Materiały stosowane jako włókna przewodzące również są identyczne jak w klejach płynnych, jednak z zachowaniem odpowiednio większych wymiarów włókien (średnicy ~100 µm, długości 1 - 5 mm).

Zastosowania klejów w przemyśle montażu elektronicznego, stanowi alternatywne rozwiązanie dla technologii lutowania oraz technologii montażu bezpośredniego. Stosuje się je jako substancje montażowe dla elementów oraz podłoży wrażliwych na wysokie temperatury, jak i w przypadku, gdy element lub podłoże są wrażliwe na inne czynniki występujące przy montażu z wykorzystaniem technik lutowania lub montażu drutowego. Technologia klejenia zapewnia również rozwiązanie problemu zastosowania lutowi zawierających związki ołowiu, jako technologia eliminująca go.

Ograniczenia w stosowaniu niektórych związków w przemyśle elektronicznym, wynikające z wprowadzenia dyrektywy RoHS [1], wymuszają zastosowanie alternatywnych rozwiązań. Główne postulaty zawarte w tej dyrektywie odnoszą się do redukcji zawartości rtęci, kadmu, ołowiu, sześciowartościowego chromu, polibromowego difenyłu i polibromowego eteru fenyloвого w odpadach sprzętu elektrycznego i elektronicznego (OSEE), w celu zmniejszenia zagrożenia dla zdrowia oraz redukcji zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

Jednakże wprowadzane na rynek lutowia bezolowiowe prowadzi za sobą wiele problemów [6 - 7]. Jednym z głównych jest fakt, iż lutowia te charakteryzują się wyższą temperaturą lutowania niż stosowane dotychczas lutowia ołowiowe. Poza oczywistą koniecznością zmiany parametrów całego procesu montażu, najczęściej wiążącą się z wymianą sprzętu na linii montażowej, występuje również konieczność stosowania elementów elektronicznych odpornych na wyższą temperaturę. Zmiana kluczowych parametrów procesu (głównie temperatury) wprowadza ryzyko wystę-

powania lokalnych uszkodzeń obwodu i elementów elektronicznych prowadzących do obniżenia wytrzymałości połączeń i niezawodności układu. Dlatego też, celem badań było porównanie parametrów elektrycznych i wytrzymałościowych połączeń elektronicznych typu Flip-Chip wykonanych metodą lutowania rozplwowego z zastosowaniem lutowi ołowiowych i bezolowiowych z montowanymi z zastosowaniem adhezyjnych substancji przewodzących. Przeprowadzenie badań porównawczych z zastosowaniem układów montowanych różnymi technikami, miało na celu wskazanie podobieństw i różnic, jakie występują przy montażu z zastosowaniem klejów przewodzących oraz lutowia PbSn i bezolowiowego. Wyniki badań mają również wskazać zalety i wady obu technologii montażowych. Kluczowym zagadnieniem jest porównanie parametrów otrzymanych złącz. Interesujące są wyniki badań przedstawiające różnice parametrów elektrycznych oraz własności wytrzymałościowe złącz klejonych i lutowanych.

2. MATERIAŁY I WZORY TESTOWE

Ponieważ głównym założeniem jest zbadanie przydatności zastosowania klejów przewodzących w montażu układów typu Flip-Chip, do badań wybrano trzy rodzaje klejów: pastę izotropową, pastę anizotropową oraz folię anizotropową [3-4]. Do badań zostały wybrane trzy rodzaje klejów przewodzących różniące się od siebie podstawowymi własnościami:

- anizotropowa pasta epoksydowa LOCTITE 3446 [8],
- izotropowa pasta epoksydowa LOCTITE 3888 [8],
- anizotropowa folia przewodząca 3M 9703 [9].

Parametry katalogowe substancji zawiecia Tab. 1. Jako obiekt porównawczy wybrany został tradycyjny stop lutowniczy Pb63Sn37 oraz pasta bezolowiowa zgodna z wymaganiami RoHS o oznaczeniu Ind 241 i składzie Sn3.8Ag0.7Cu.

Tabela. 1. Podstawowe właściwości zastosowanych adhezyjnych substancji przewodzących [8-9]

Table 1. Main properties of examined conductive adhesives [8-9].

	Pasta anizotropowa LOCTITE 3446	Pasta izotropowa LOCTITE 3888	Folia anizotropowa 3 M 9703
Substancja adhezyjna	Termoutwardzalna żywica epoksydowa	Chemoutwardzalna żywica epoksydowa	Akryl grubość 50 μm
Wypełniacz przewodzący	SnBi	Ag	Ni pokryty AG

	Pasta anizotropowa LOCTITE 3446		Pasta izotropowa LOCTITE 3888				Folia anizotropowa 3 M 9703
Kształt/Rozmiar	Kulki/7 μm		Płatki/40:10:1 μm				Kulki/30 μm
Składowanie	2°C-8°C		Rozdzielnie 23°C/6 m-cy Wymieszane 40°C/1 rok				21°C/24 m-ce 50% wilgotność
Temperatura zeszklenia	156°C		50°C				bd
Grubość	Nd*		Nd*				50 μm
Parametry montażu							
Temperatura aplikowania	180°C	150°C	22°C	65°C	125°C	150°C	15°C - 70°C
Czas	5 s	30 min	24 h	2 h	1 h	30 min	24 h (pełne związanie)
Nacisk/kontakt	10 MPa		Nd*				Chwilowe 0,1 MPa
Powierzchnia kontaktów	Min 0,01 mm ²		Bd**				Min 0,03 mm ²
Odległość między kontaktami	Min 0,2 mm		Bd**				Min 0,40 mm

*Nd – nie dotyczy

**Bd- brak danych

Głównym celem badania własności elektrycznych było ukazanie różnicy w parametrach pomiędzy połączeniami wykonanymi przy zastosowaniu lutowni PbSn i pasty Ind 241 oraz wykonanymi przy zastosowaniu trzech rodzajów adhezyjnych kompozytów przewodzących. Zastosowanie tych substancji zostało ograniczone do połączeń ukrytych typu Flip-Chip. Tego rodzaju połączenia z racji swojego występowania pomiędzy strukturą krzemową, a płytką podłożową są bardzo trudne do badania czy nawet obserwowania [4]. Dlatego też została wybrana techniczna metoda pomiaru rezystancji, zwaną inaczej metodą prądowo-napięciową. Charakteryzuje się ona prostotą przeprowadzenia i jest obciążona małym błędem pomiarowym, gdyż można w niej wyeliminować większość rezystancji pośrednich i ograniczyć łańcuch pomiarowy jedynie do rezystancji połączenia [10-11].

Doprowadzenie sond pomiarowych do obiektu o tak małych wymiarach (300 μm) było znacznym problemem. Ostatecznie została wybrana metoda z zastosowaniem

sond ostrzowych, o wymiarach końcówki pomiarowej w granicach 100 μm , umożliwiającą bezpośrednio mierzenie spadku napięcia na mikropołączeniu.

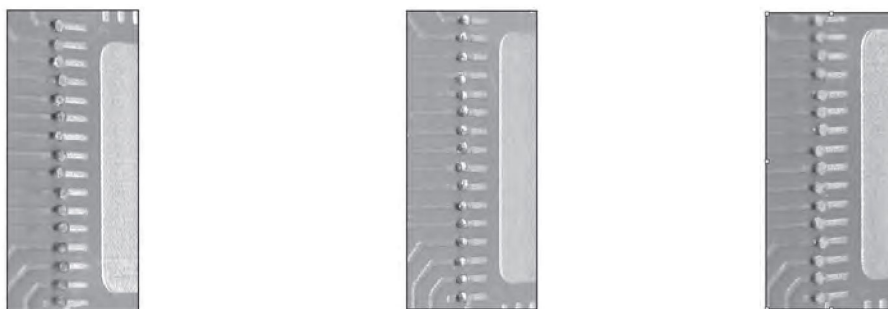
Aby uprościć przeprowadzenie badań zaproponowana została metoda z zastosowaniem połączeń częściowo odkrytych. Ideą tego rodzaju połączeń jest wykorzystanie płytki podłożowej z naniesionymi ścieżkami oraz wytworzonymi kontaktami podwyższonymi oraz płytki z metalu o bardzo dobrych właściwościach elektrycznych i małej grubości, w celu zapewnienia jak najmniejszego wpływu rezystancyjnego. Jako materiał wykorzystano miedź o grubości $\sim 100 \mu\text{m}$. Rys. 3 przedstawia schematyczny przekrój przez badane połączenie.



Rys. 3. Budowa obiektu z kontaktami częściowo ukrytymi.
Fig. 3. Cross section of proposed (semi) flip-chip microjoint.

Wymienione kleje przeznaczone są do montażu powierzchniowego elementów, taśm (obwodów elastycznych) oraz do uzupełniania ubytków w obwodach elektrycznych [8-9]. Do badań użyto podłoża polimerowego wykonanego z laminatu FR-4. Ścieżki wykonano z miedzi i pokryto złotem. Całą płytkę pokryto maską lutowniczą, poza polami kontaktowymi i pomiarowymi.

Wykonano dwa rodzaje kontaktów podwyższonych. Do montażu przy zastosowaniu pasty oraz taśmy anizotropowej wymagane są kontakty podwyższone płaskie, tu wykonane ze stopu PbSn (dla pasty) i złota (dla taśmy) [4]. Pasta izotropowa nie wymaga spłaszczania kontaktów, więc kontakty podwyższone wykonane z lutowia PbSn nie zostały poddane temu procesowi. Kontakty PbSn zostały otrzymane poprzez przetopienie rozplywowe kulek o średnicy 250 μm . Kontakty złote wykonane zostały w procesie termokompresji z drutu złotego o średnicy 100 μm . Kontakty bezolowiowe zostały wykonane przez naniesienie z pasty IND 241 na pola kontaktowe przy pomocy igły transferowej.



a) Au po planaryzacji (planar)

b) PbSn

c) PbSn po planaryzacji (planar)

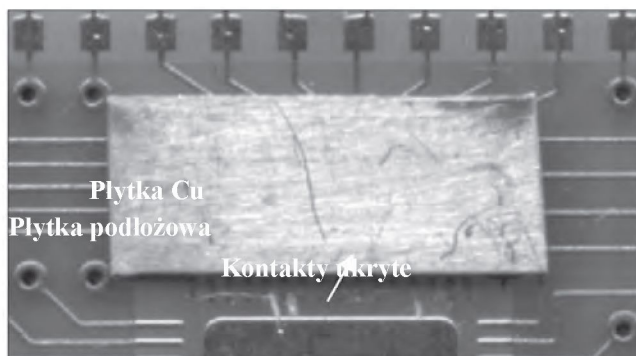
Rys. 4. Kontakty podwyższone.

Fig. 4. Bumps for adhesives.

Do przeprowadzenia badań potrzebne było wykonanie pięciu rodzajów obiektów. Trzy obiekty z zastosowaniem adhezyjnych substancji przewodzących miały posłużyć do przeprowadzenia głównych badań parametrów elektrycznych. Pozostałe dwa obiekty zostały wykonane wykorzystując połączenia lutowane ołowiowe i bezolowiowe. Do wytworzenia połączenia z zastosowaniem odpowiedniej substancji wymagane jest zapewnienie odpowiednich czynników zewnętrznych:

- klej izotropowy chemoutwardzalny, wiąże w temperaturze pokojowej w wyniku zachodzących reakcji chemicznych. Zwiększenie temperatury przyspiesza wiązanie kleju [8]. Podczas montażu, substancja wiązała przez wymagany okres powyżej 24 h,
- klej anizotropowy termoutwardzalny wiąże w podwyższonej temperaturze 150°C przez okres kilku sekund, przy nacisku 10 MPa [8].
- folia anizotropowa aplikowana w temperaturze pokojowej, z naciskiem 1 MPa. Poprawne połączenie zostało uzyskane z zastosowaniem silnego nacisku o nieokreślonej wartości, zgodnie z wymaganiami określonymi w dokumentacji [9],
- połączenie lutowane PbSn wykonane w piecu rozpliwowym z zaprogramowanym cyklem: podgrzanie do temperatury 170°C w czasie 35 s; wygrzanie przez okres 160 s; podgrzanie do temperatury 220°C w czasie 25 s; chłodzenie do 21°C,
- połączenie lutowane Ind 241 wykonane w piecu rozpliwowym z zaprogramowanym cyklem: podgrzanie do temperatury 210°C w czasie 35 s; wygrzanie przez okres 160 s; podgrzanie do temperatury 260°C w czasie 40 s; chłodzenie do 21°C.

Wszystkie obiekty badań w ogólnym widoku wyglądają podobnie. Rys. 5 przedstawia widok płytki laminatowej FR4 z topologią obwodu i z zamontowaną płytką miedzianą na kontaktach podwyższonych ukrytych.

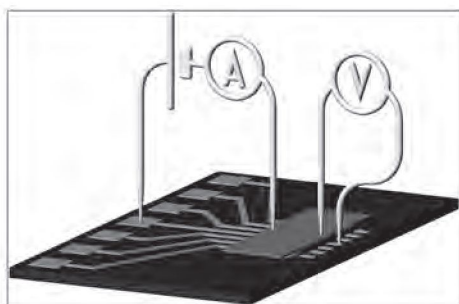


Rys. 5. Obiekt badań (zbliżenie na obszar folii miedzianej).

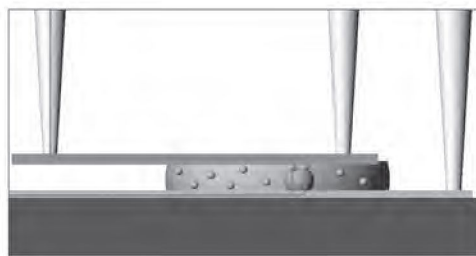
Fig. 5. Test sample (closeup on copper foil).

3. BADANIA PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH.

Zgodnie z opisem metody technicznej pomiaru rezystancji, potrzebne było wybranie odpowiednich punktów doprowadzenia prądu oraz punktów pomiarowych. Niewłaściwe umiejscowienie tych punktów może spowodować pomiar rezystancji na całej długości ścieżek zasilających [10 - 11]. Przepływ prądu przez złącze obrazuje Rys. 6.



obwody: przepływu prądu i pomiarowy (circuit: current flow and measurement)



przekrój przez badane złącze (przepływ prądu) examined joint model cross section (current flow)

Rys. 6. Schemat układu pomiarowego.

Fig. 6. Measuring stand model diagram.

Rezystancja R obliczona ze wskazań przyrządów ma wartość

$$R = \frac{U_V}{I_A} = \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}$$

gdzie:

R_x – rezystancja złącza

R_v – rezystancja woltomierza

U_v – napięcie pomiarowe wskazywane przez woltomierz,

I_A – prąd płynący przez złącze.

Wartość rezystancji wyznaczona zgodnie z prawem Ohma odpowiada wartości wypadkowej równoległego połączenia rezystora R_x i woltomierza R_v . Systematyczny błąd względny równy jest:

$$\Delta_v = R - R_x \approx \frac{R_x}{R_v} \rightarrow 0$$

natomiast błąd względny ma wartość:

$$\Delta_v = \frac{R - R_x}{R_x} \approx -\frac{R_x}{R_v} \rightarrow 0$$

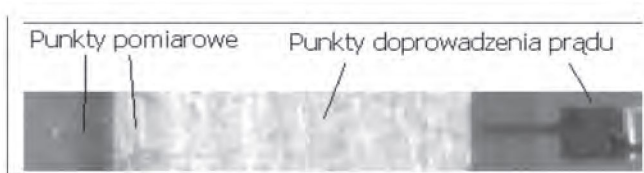
Błędy otrzymywane podczas pomiaru metodą techniczną wahają się w granicach 0,5%–2%, a więc jest to dosyć dokładna metoda służąca do mierzenia bardzo małych rezystancji.

Głównym problemem występującym przy pomiarze napięcia na rezystorze badanym, było zmierzenie wartości napięcia bezpośrednio na zaciskach rezystora, z pominięciem przewodów doprowadzających, które również stanowią opór dla prądu. Problem ten rozwiązano podprowadzając sondy pomiarowe woltomierza w najbliższe sąsiedztwo mikropołączenia (Rys. 6–7). Zachodzi pytanie czy rezystancja przewodów pomiarowych woltomierza nie wprowadziła błędu pomiaru? Ponieważ woltomierz posiada znacznie większą rezystancję niż badany obiekt, prąd płynący poprzez miernik można pominąć, gdyż wywołuje on spadek napięcia, na przewodach jak i samym woltomierzu, o znacznie mniejszej wartości niż napięcie na badanym rezystorze. Stosunek prądu płynącego przez badane połączenie, do prądu w obwodzie woltomierza, jest podobny jak stosunek rezystancji woltomierza do rezystancji badanego rezystora.

$$\frac{I_x}{I_v} \approx \frac{R_v}{R_x}$$

Ponieważ oczekiwana rezystancja połączenia nie powinna przekraczać $500\text{ m}\Omega$, przy rezystancji woltomierza sięgającej $\sim 10\text{ M}\Omega$, błąd pomiaru napięcia nie powinien przekraczać $10^{-5}\%$.

Umieszczenie sond pomiarowych poza obwodem prądowym, wykluczało pomiar rezystancji ścieżki lub płytki miedzianej. Przy założeniu, iż woltomierz posiada nieskończoną rezystancję, miernik wskazał jedynie różnicę potencjałów przed i za mikrozłączeniem. Punkty doprowadzenia zacisków prądowych oraz sond pomiarowych przedstawione są na Rys. 7.



Rys. 7. Zdjęcie ukazujące punkty pomiarowe.

Fig. 7. Closeup on measure points on specimen.

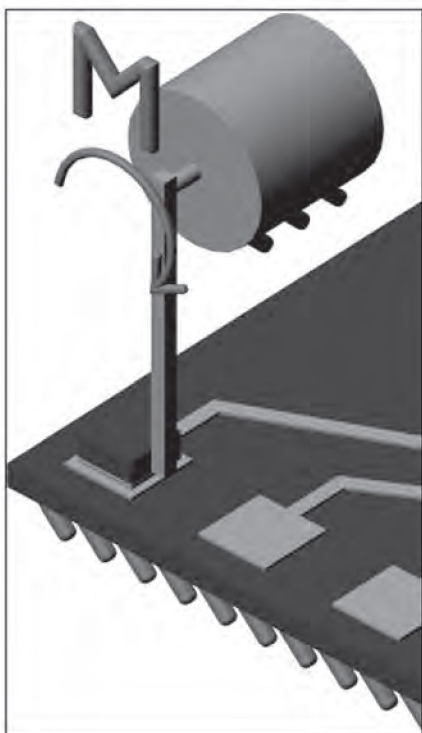
4. BADANIA PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH.

Elementy elektroniczne narażone są na wpływ czynników mechanicznych [2-4]. Każdy obwód elektryczny zamocowany w obudowie, poddawany jest szeregowi naprężeń powstałych na skutek odkształceń mechanicznych czy też termicznych, zarówno płytki podłożowej, jak i obudowy. Siły działające na pojedynczy element powstałe w wyniku naprężeń występujących na styku układ-płytki podłożowa, w skrajnych przypadkach (transport, nieoczekiwane uderzenie, rezonans mechaniczny, itp.) mogą osiągać znaczące wartości. Ponieważ omawiane badania dotyczą układów typu Flip-Chip montowanych powierzchniowo, głównym czynnikiem mechanicznym działającym na te układy są siły ścinające [3-4].

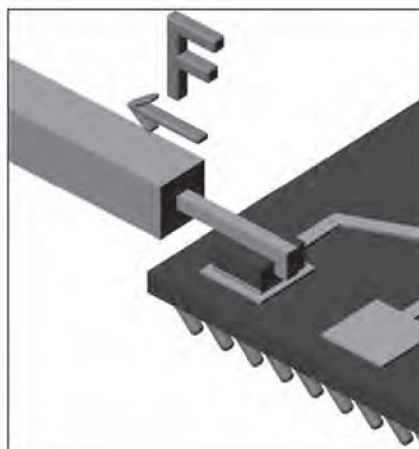
Aby zbadać jakie wartości obciążenia może wytrzymać połączenie wykonane przy zastosowaniu adhezyjnych substancji przewodzących, należy poddać odpowiednio przygotowaną próbkę działaniu siły ścinającej. Do tego celu zostało wykorzystane stanowisko pomiarowe służące do badania wytrzymałości na ścinanie kontaktów podwyższonych, pracujące w zakresie badanej siły do 350 g oraz dynamometr o znacznie większym zakresie pomiarowym, jednak o znacznie mniejszej czułości.

Stanowisko pomiarowe zostało zbudowane w Zakładzie Technologii Wyrobów Precyzyjnych i Elektronicznych Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Uproszczony schemat budowy stanowiska przedstawia Rys. 8. Stanowisko wykorzystuje silnik krokowy do wywołania momentu obrotowego. Ramię pomocnicze

zamontowane jest na jego osi prostopadle do osi obrotu. W punkcie podparcia na końcu dźwigni występuje siła prostopadła do ramienia.



Stanowisko pomiarowe (laboratory stand)

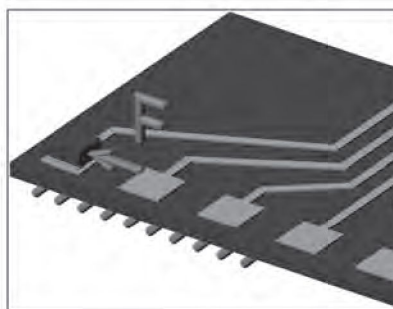


Pomiar dynamometrem (dynamometer)

Rys. 8. Schemat pomiaru wartości sił ścinających.

Fig. 8. Model diagram for measurement of shear strength.

Płytką podłożową zamocowana została na sztywno z podstawą urządzenia ściągającego. Punkt oparcia elementu wywołującego siłę ścinającą został tak dobrany aby wykluczyć oparcie o kontakt podwyższony, co mogło by znacznie zniekształcić wyniki badań. W obu wypadkach kierunek i przyłożenie działającej siły było identyczne, co obrazuje Rys. 9.



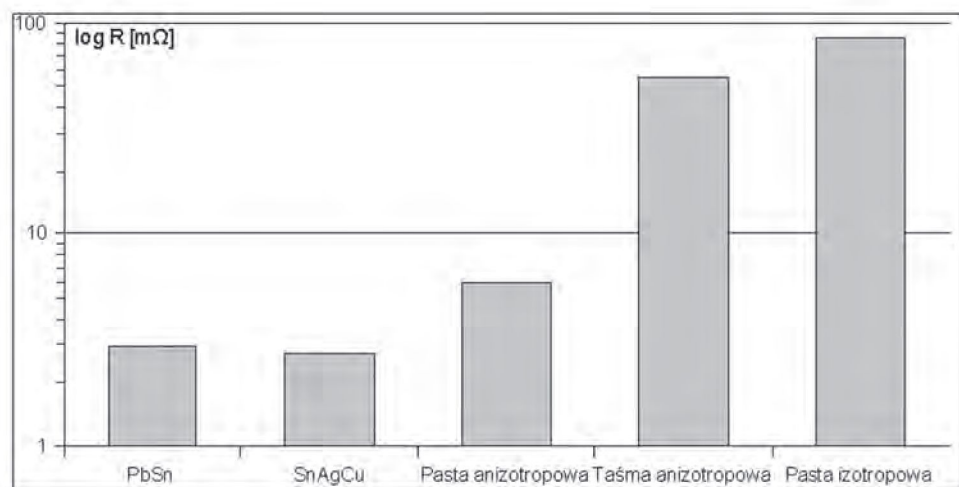
Rys. 9. Działanie siły ścinającej.

Fig. 9. Shear force direction.

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH

Zasadniczym celem przeprowadzenia pomiarów było uzyskanie danych na temat wartości rezystancji mikropołączenia wytworzonego przy zastosowaniu adhezyjnych substancji przewodzących. Ponieważ przeprowadzenie dokładnych badań w tej dziedzinie wymagałoby posiadania specjalistycznego sprzętu oraz opracowania skomplikowanych metod pomiarowych, badania zostały przeprowadzone w jak najdokładniejszy sposób, na dostępnym sprzęcie, z myślą o stworzeniu metody porównawczej badania rezystancji. Głównym celem stosowania tych substancji jest tworzenie połączenia elektrycznego w układach, w których nie można zastosować innego rodzaju połączenia. Praca ta jest próbą sprawdzenia czy przewodzące substancje adhezyjne mogą być stosowane jako substytut połączeń lutowanych. Interesującą informacją jest więc nie sama wartość rezystancji zmierzona jak najdokładniej, lecz stosunek wartości rezystancji połączenia klejonego do wartości rezystancji połączenia lutowanego. Daje to nam pogląd na możliwości zastosowania tych materiałów jako ewentualnych zamienników połączeń z zastosowaniem lutowni PbSn i alternatywy dla połączeń realizowanych lutownicami bezołowiowymi. Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych badań można zobrazować wartości rezystancji dla połączeń poszczególnego rodzaju. Na Rys. 10 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji dla wszystkich trzech rodzajów połączeń oraz dla połączeń lutowanych.



Rys. 10. Porównanie wartości rezystancji dla różnych rodzajów połączeń.

Fig. 10. Resistance values for different types of joints.

Najbardziej stabilne i powtarzalne okazały się połączenia wykonane metodą lutowania. Wyniki otrzymane na drodze badań, dają bazę wyjściową do porównania wartości rezystancji połączenia lutowanego z zastosowaniem eutektyki PbSn do wartości rezystancji połączeń wykonanych z wykorzystaniem klejów przewodzących.

Ponieważ przy tworzeniu połączeń z zastosowaniem klejów 3446 i 3888 jako kontakty podwyższone stosowano stop PbSn całkowita wartość rezystancji jest powiększona o rezystancję kontaktu. Znając wartość rezystancji kontaktu można oszacować rezystancję samego połączenia klejonego.

Średnia wartość rezystancji dla serii 14 połączeń wyniosła 2,94 m Ω , co będzie wartością odniesienia dla porównania z resztą wyników otrzymanych w badaniach. Wartości rezystancji otrzymane dla połączeń klejonych są znacznie mniej powtarzalne niż dla połączenia lutowanego.

Rezystancja mikropołączenia wykonanego z zastosowaniem lutowia bezołowiowego IND 241 pasuje się na podobnym poziomie z wartością 2,74 m Ω . Jednocześnie daje się zauważyć wpływ podwyższonej temperatury procesu lutowania. Płytkę podłożowa wygrzana w temperaturze 260°C nosi na sobie ślady uszkodzeń termicznych rozpoznawalnych poprzez zmianę koloru podłoża oraz nieznaczną deformację struktury płytki. Zmian tego typu nie zauważono na płytkach z lutowiem PbSn.

Połączenia realizowane przy wykorzystaniu pasty anizotropowej charakteryzują się znacznie mniejszą jednorodnością. Średnia rezystancja uzyskana w tym obiekcie badawczym wyniosła 8,89 m Ω , przy czym największa zarejestrowana wartość wynosiła powyżej 20 m Ω , a najniższa 4,41 m Ω . Stosując korektę rezystancji o wartość kontaktu PbSn otrzymuje się średnią wartość na poziomie 5,95 m Ω . Obserwacja przeprowadzona pod mikroskopem wykazała, iż kontakty nie zostały zdeformowane, jak i nie miały bezpośredniego połączenia z płytką metalową. Potwierdza to fakt, że kontakty zostały wykonane w sposób prawidłowy, choć miejscami niezbyt dokładny, na co wskazywał rozrzut wyników badań.

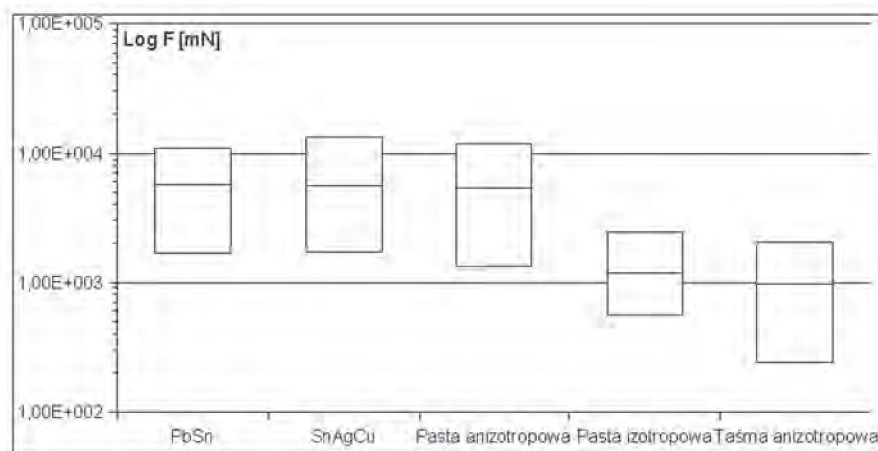
Dla połączenia wykonanego z zastosowaniem taśmy anizotropowej wyniki rozkładały się odmiennie. Wartości układały się na średnim poziomie 52 m Ω , przy czym zaobserwowano dwie rezystancje przekraczające 100 m Ω i jedną poniżej 3 m Ω . Pozostałe uzyskane wartości rezystancji przekraczające 100 m Ω mogły być wynikiem niestabilności mechanicznej połączenia lub niedokładnym planowaniem kontaktów podwyższonych. Wartość rezystancji mniejsza od 3 m Ω mogła zaistnieć w prawidłowym połączeniu anizotropowym, gdyż samo połączenie elektryczne niewiele różni się od połączenia z zastosowaniem pasty anizotropowej. Możliwe jest jednak, że nastąpił mechaniczny kontakt pomiędzy płytką miedzianą a złotym kontaktem podwyższonym. Nie jest to jednak przypadek szkodliwy.

Ostatnim obiektem podlegającym omówieniu jest połączenie wykonane przy zastosowaniu pasty izotropowej. Średnia wartość rezystancji znacznie przekraczała wartości otrzymywane przy poprzednich materiałach i dla całej serii pomiarowej wynosiła $R_{sr} = 84$ m Ω . Odnotowano serię rezystancji na poziomie od 7 do 32 m Ω ,

wartość $\sim 80 \text{ m}\Omega$ oraz dwie wartości powyżej $200 \text{ m}\Omega$. Obserwacja przeprowadzona pod mikroskopem dowiodła, iż pod względem technologicznym połączenia zostały wykonane poprawnie. Klej pozostał na pojedynczych kontaktach i nie prowadził do zwarć między nimi, co jest głównym problemem przy montażu tego typu. Klej zwilżył również równomiernie płytkę miedzianą. Wartości rezystancji powyżej $200 \text{ m}\Omega$ mogły być spowodowane lokalną nierównością kontaktów podwyższonych lub płytki miedzianej, prowadzącą do znacznego zwiększenia grubości połączenia klejonego. Nie stosowano tutaj obciążeń siłowych przy montażu, więc kontakty nie uległy deformacji.

5.2. WYNIKI POMIARÓW PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Podobnie jak w przypadku badań parametrów elektrycznych bazą do stworzenia porównania parametrów będą wyniki badań lutowia PbSn. Rys. 11 zawiera rozkład sił ścinających w przypadku poszczególnych połączeń. Jak widać rozkład jest dosyć nieregularny, co daje nam możliwość oceny, iż parametry wytrzymałościowe mają mniejszą powtarzalność niż parametry elektryczne.



Rys. 11. Wykres wartości obciążeń przenoszonych przez badane połączenia.

Fig. 11. Shear strength values for different types of joints.

Połączenia wykonane metodą lutowania z zastosowaniem lutowia ołowiowego jak i bezołowiowego uzyskały podobne wartości średnie niszczonej siły ścinającej. Zbliżoną wartością średnią siły niszczonej charakteryzuje się również pasta ani-

zotropowa. Uzyskane wartości to odpowiednio 5,8N dla lutowia PbSn, 5,5N dla lutowia SnAgCu i 5,4N dla pasty anizotropowej. Podobną zależność można było również zauważyć dla wartości maksymalnych, jak i minimalnych sił ścinających. W przypadku kleju anizotropowego maksymalna wartość w serii była nawet większa od maksymalnej wartości dla połączenia z zastosowaniem lutowia PbSn.

Głównym mechanizmem tworzenia wytrzymałych złącz klejonych jest zdolność do łączenia jak największych powierzchni [2-4]. W przypadku badanych złącz dla których siły niszczące osiągały największe wartości można było zauważyć większą powierzchnię pokrycia kontaktu przez klej. Jest to zjawisko dozwolone, a nawet oczekiwane w przypadku klejów anizotropowych, które mają jednocześnie spełniać rolę substancji hermetyzującej i są aplikowane pod całą powierzchnią układu [3-4].

Pozostałe dwa obiekty montowane z zastosowaniem kleju izotropowego i taśmy anizotropowej uzyskały wyniki nieprzekraczające wartości minimalnej, określonej dla połączenia lutowanego. W przypadku kleju izotropowego częściowym czynnikiem mogła być utrata prawidłowych właściwości adhezyjnych ze względu na niewłaściwe przechowywanie, co zostało potwierdzone przez dostawcę próbek dopiero po zgłoszeniu zastrzeżeń co do wyników obserwacji. Obrazuje to jak ważne jest wspomniane wcześniej właściwe magazynowanie ich w niskich temperaturach. Oczekiwane wartości sił niszczących powinny być w tym przypadku zbliżone do wartości uzyskanych w przypadku kleju anizotropowego ze względu na podobne własności wytrzymałościowe obu materiałów osnowy kompozytowej.

Taśma anizotropowa stwarzała wiele problemów przy poprawnym zaaplikowaniu. Przyklejenie jej kawałków o wymiarach większych niż kontakty mogłoby spowodować zniekształcenie wyników pomiaru. Małe odcinki taśmy były jednak niemożliwe do uzyskania. Ostatecznie wybrane kawałki o przybliżonych wymiarach 1x1 mm pokazały, że taśma ta charakteryzuje się dosyć powtarzalnymi wynikami pomiaru siły ścinającej, w granicach $F_{sr} = 0,5N$, jest jednak bardzo niestabilna pod wpływem działającego obciążenia i odkształca się bezpowrotnie nawet po odjęciu siły przed zniszczeniem połączenia. Jednakże sposób aplikowania taśmy jest podobny jak w przypadku pasty anizotropowej, gdyż jej zadaniem jest również wypełnienie przestrzeni pomiędzy montowanymi układem a płytką podłożową. Dlatego w przypadku aplikowania taśmy na większą powierzchnię zachowuje ona bardziej stabilne parametry i przenosi obciążenia o większych wartościach. Potwierdziły to szacunkowe obserwacje obiektów próbnych wykonanych z zastosowaniem większych odcinków taśmy o wymiarach 5 x 20 mm. Po narażeniach wstrząsowych wynikłych podczas kilkudniowej symulacji warunków transportowych połączenie nie uległo uszkodzeniu i zachowywało kontakt elektryczny. Ze względu na odmienny sposób montażu niż ogólnie zastosowany do badań, a mogący wprowadzić znaczne błędy pomiaru rezystancji, wartości połączeń nie zostały pomierzone.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaproponowana porównawcza metoda pomiaru parametrów elektrycznych i mechanicznych mikropołączeń zaowocowała uzyskaniem wyników pozwalających jednoznacznie ocenić stopień przydatności klejów przewodzących w porównaniu do połączeń uzyskanych metodą lutowania w technologii montażu układów elektronicznych z kontaktami ukrytymi typu Flip-Chip. Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań ukazują różnice i podobieństwa we właściwościach badanych substancji stosowanych w mikromontażu elektronicznym. Właściwości elektryczne mikrozłączy wykonanych z zastosowaniem kompozytowych substancji przewodzących są zbliżone do wartości jakie uzyskiwały połączenia wykonane z powszechnie stosowanych past lutowniczych, w tym bezołowiowej pasty SnAgCu. Podobnie własności mechaniczne obu rodzajów złączy są zbliżone. Wykonane serie pomiarów oraz porównawcza metoda oceny przydatności tego rodzaju połączeń pokazuje, że istnieją materiały wystarczające do tworzenia połączeń elektrycznych o parametrach porównywalnych do wycofywanych z produkcji połączeń z wykorzystaniem lutowni PbSn. Jednocześnie pozwalają one na wyeliminowanie ograniczeń występujących w obecnie stosowanych materiałach, co jest dalszym krokiem w celu większej integracji i miniaturyzacji obwodów elektrycznych.

Jednocześnie wydaje się, że wskazane byłoby rozwinięcie przeprowadzonych badań. Badane obiekty mogłyby być dodatkowo poddane badaniom właściwości impedancyjnych oraz odporności na zakłócenia elektromagnetyczne. Połączenia z wykorzystaniem polimerowych kompozytów przewodzących z fazą metaliczną są wrażliwe na sygnały wywołane zmiennym polem elektromagnetycznym. Może być to wadą w przypadku mikropołączeń, ale znajduje zastosowanie w produkcji anten oraz ekranów grubowarstwowych [12]. Zastosowanie ich w układach mikroprocesorowych, gdzie dużą wagę przywiązuje się do zachowania stabilności sygnału, wymaga również zbadania parametrów impedancyjnych dla prądów o częstotliwościach GHz występujących w tego rodzaju obwodach. Przeprowadzenie takich badań jest jednak bardzo skomplikowane i wymaga wysoce specjalistycznego sprzętu [10]. Niestety dokumentacje firm zajmujących się wytwarzaniem adhezyjnych substancji przewodzących w ogóle nie uwzględniają wyników tego typów badań, a literatura naukowa rzadko zawiera wzmianki o prowadzeniu badań w tej dziedzinie. Jednakże występowanie impedancji w połączeniach klejonych może być ich główną barierą w zastosowaniach dla układów logicznych pracujących z coraz wyższymi częstotliwościami sygnałów [13].

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 6 października 2004 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących ograniczenia wykorzystywania w sprzęcie elektronicznym i elektrycznym niektórych substancji mogących negatywnie oddziaływać na środowisko (Dz.U. Nr 229, poz. 2310)
- [2] J. Cogle.: *Poradnik inżyniera i technika – Kleje i klejenie*, WNT Warszawa 1977, 556-570
- [3] J.J. Licari, D. W. Swanson: *Adhesives Technology for Electronic Applications. Materials, Processing, Reliability* (2005)
- [4] K. Gillo K.: *Area Array Packaging Handbook: Manufacturing and Assembly*, McGraw-Hill Handbooks, New York 2001
- [5] Ch. Kittel: *Wstęp do fizyki ciała stałego*, PWN, Warszawa 1999, 182
- [6] S. Chada, L. J. Srinivas.: *Lead-Free Solders and Processing Issues Relevant to Micro-electronic Packaging*, *Journal of Electronic Materials*, 33, 12 (2004) 1411-1618
- [7] J.P. Lucas, S. Chada, S.K. Kang, C.R. Kao, K.L. Lin, J. Ready: P.: *Special issue on lead-free solders and processing issues in microelectronic packaging*, *Journal of Electronic Materials*, 32, 12 (2003) 1359-1526
- [8] Katalog i dane techniczne produktów firmy LOCTITE
- [9] Katalog i dane techniczne produktów firmy 3M
- [10] J. Dusza, G. Gortat, A. Leśniewski.: *Podstawy miernictwa*, 228-242/254-273, OWPW, Warszawa 1998
- [11] A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki.: *Metrologia elektryczna*, 403-410, WNT, Warszawa 2003
- [12] K.P. Saha, S.M. Shamim Hasan, A. Zahirul Alamim.: *Improvement of shielding effectiveness of conductive composite for electromagnetic shielding*, *Proceedings of the International Conference Electromagnetic Interference and Compatibility'99*, 357-360
- [13] S.M. Wentworth, B.L. Dillaman, J.R. Chadwick, C.D. Ellis, R.W. Johnson.: *Attenuation in Silver-Filled Conductive Epoxy Interconnects*, *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, 20, 1 (1997)

SUMMARY

APPLICATION OF CONDUCTIVE ADHESIVES IN ELECTRONIC MIKROASSEMBLY AS ALTERNATIVE TO SOLDER BONDINGS

Present article contains analysis of existing solutions for conductive adhesives application in electronics products assembly. The goal is to introduce conductive adhesives as alternative to solder technology in microelectronic assembly. Presently

used PbSn solders containing lead are forced to be removed from this branch of technology by RoHS directive which restricts use of lead, mercury, cadmium and hexavalent chromium in electronics products [1]. New, lead-free solders requires higher solder temperatures what leads to higher risk of damage to soldered components. Application of conductive adhesives allows to avoid this types of risks.

This publication presents description and results of investigation, that have on purpose direct comparison of electrical and mechanical parameters of joints fabricated from conductive adhesives vs. PbSn and lead-free solder technology. Proposed comparative measurement method of microjoints electrical and mechanical parameters allows explicitly evaluate usefulness of conductive adhesives in Flip-Chip electronic assembly technology.