

## Montaż struktur AlGaIn/GaN na Si do podłoża DBC w oparciu o technologię SLID oraz zgrzewania dyfuzyjnego mikroproszkiem Ag

**Streszczenie.** Wykonano i zbadano układy połączeń chipów tranzystora HEMT AlGaIn/GaN/(111)Si, metalizowanych warstwami montażowymi Cu, Ag lub Au, z podłożami DBC wykorzystując technologię SLID oraz technologię zgrzewania mikroproszkiem Ag. Siły adhezji połączeń chipów, w których zastosowano pośrednią galwaniczną warstwę (1 μm)Sn, dobraną siłę nacisku, temperaturę 280°C i czas 30 min. dla procesu spiekania, są powyżej 22 MPa. Połączenie chipu ze spodnią metalizacją Ag zgrzewane z DBC poprzez mikroproszek Ag cechuje siła adhezji powyżej 22 MPa.

### Abstract

The connection systems of AlGaIn/GaN on (111)Si chip metallized with Cu, Ag or Au (mounting layers) were performed to DBC plates using Solid Liquid phase Interdiffusion (SLID) technology and Ag sintering bonding, and the systems were verified. The chip adhesion forces for DBC samples with intermediate galvanic (1 μm)Sn layer, and the load force matched to the chip size, temperature of 280°C and time of 30 min. for the sintering process, are above 22 MPa. Ag sintering bonding of the chip with backside Ag metallization to DBC substrate is exceeding 22 MPa. (Assembly of AlGaIn/GaN structures on Si to DBC substrates by using SLID technology or diffusion sintering with Ag micropowder)

**Słowa kluczowe:** montaż, technologia połączeń SLID, DBC, HEMT, AlGaIn/GaN/Si

**Keywords:** assembly, SLID technology, DBC, HEMT transistor, AlGaIn/GaN/Si

### Wstęp

Obecnie konstruowane elementy półprzewodnikowe na materiałach o szerokiej przerwie, jak np. GaN i SiC, przeznaczone dla elektroniki wysokich mocy i napięć wymagają opracowania wysokiej jakości połączeń z obudową i elektrycznych wyprowadzeń. Technologia SLID (Solid Liquid Interdiffusion) jak i technologia zgrzewania nano- i/lub mikroproszkami Ag wykorzystywane są do montażu elementów półprzewodnikowych do podłoża ceramicznych lub w obudowach metalowych. W technologii SLID wykorzystuje się zjawiska zachodzące między materiałami o wysokich temperaturach topnienia (np. Ag, Au, Cu, Ni) a materiałami niskotopliwymi (np. Sn czy In) [1-4]. Proces SLID prowadzi się w temperaturach nieznacznie przekraczających temperaturę topnienia materiału niskotopliwego. Stopiony materiał reaguje z materiałem wysokotopliwym tworząc związki międzymetaliczne odpowiedzialne za jakość połączenia. Cechą procesu SLID opartego na Sn jest to, że można go prowadzić w temperaturach nieznacznie przekraczających temperaturę topnienia Sn (232°C), a więc w temperaturach zbliżonych do lutowania lutami opartymi na Sn (np. typu SAC). Połączenia wykonywane tą technologią cechują na ogół dobre właściwości mechaniczne, a właściwości elektryczne i cieplne zależą od typu powstających związków międzymetalicznych.

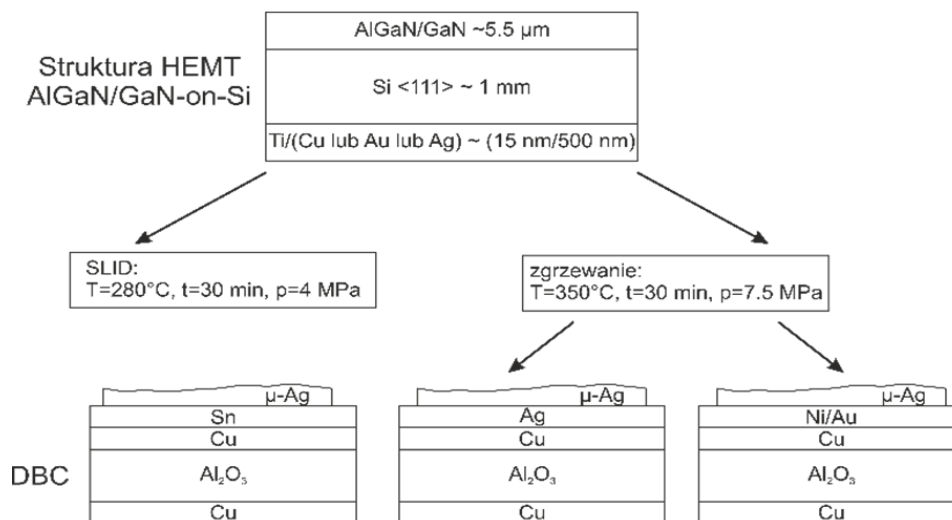
Technologia zgrzewania nano- i/lub mikroproszkami Ag opiera się na dyfuzyjnym połączeniu między metalizacjami struktury półprzewodnikowej a metalizacją podłoża z udziałem warstwy proszku Ag [5-7]. Proces zgrzewania prowadzi się pod naciskiem i w wyższych temperaturach niż proces SLID, aby umożliwić wzajemną dyfuzję metali. Duża energia powierzchniowa nano- i mikrocząstek Ag pozwala na prowadzenie procesu w temperaturach nieznacznie przekraczających 300°C. W przypadku wykorzystywania tylko nanocząstek Ag temperaturę procesu można obniżyć do ok. 200°C. Wykorzystywanie w montażu podłoża DBC (Direct Bond Copper), w których ceramika alundowa pokryta jest obustronnie grubą warstwą Cu, pozwala na uzyskanie wysokiej sprawności transmisji ciepła z obciążonego elementu półprzewodnikowego do podłoża obudowy.

Celem prezentowanych badań jest opracowanie technologii montażu struktur półprzewodnikowych z szeroką przerwą zabronioną do podłoża DBC w oparciu o technologię SLID oraz technologię zgrzewania

mikroproszkami Ag. Przedmiotem badań są połączenia struktur tranzystora mocy HEMT (High Electron Mobility Transistor) z AlGaIn/GaN/Si do płytek DBC.

### Opis eksperymentu

Do montażu struktur tranzystora HEMT do podłoża DBC wykorzystano: technologię SLID oraz technologię zgrzewania opartą o mikroproszki Ag. Montowano zakupione, komercyjne struktury tranzystora HEMT AlGaIn/GaN wyhodowane na podłożu (111)Si o grubości 1 μm. Struktury te przygotowano do montażu w ten sposób, że od spodu nałożono metodą rozpylania katodowego kolejno warstwę adhezyjną Ti (15 nm) i warstwę montażową grubości 500 nm, którą stanowiły Au, Ag lub Cu. Wykonano z nich chipy o wymiarze 3 mm × 3 mm. Struktury te montowano do podłoża DBC. Zastosowane tutaj podłoże DBC to ceramika alundowa o grubości 0,63 mm, pokryta obustronnie warstwą Cu o grubości 200 μm. Do montażu w technologii SLID wykorzystano podłoża jednostronnie szlifowane i pokrywane galwanicznie warstwą Sn o grubości 1 μm lub 2 μm. Do montażu technologii zgrzewania mikroproszkami Ag stosowano podłoża DBC jednostronnie szlifowane i galwanicznie pokryte warstwą Ag o grubości 2 μm, lub pokrywanie warstwami Ni (grubość 3 μm) pogrubionego warstwą Au o grubości 1 μm. Montaż do podłoża DBC z metalizacjami Sn, Ag oraz Au wykonywano z użyciem dodatkowej warstwy łączącej z mikroproszku Ag (AX20LC firmy Amepox), stosując różne siły nacisku, zmieniając czas łączenia oraz temperatury spiekania w zakresie od 280°C do 350°C. Proces montażu wykonywano w ten sposób, że na podłoże DBC z warstwą Sn lub Ag albo Au nanoszono metodą dozowania warstwę mikroproszku Ag, na nią układano chipy z metalizacjami Au, Ag oraz Cu, następnie pod dobranym naciskiem wykonywano operację łączenia w podwyższonej temperaturze, Rys. 1. Ustalając parametry procesu SLID stosowano najpierw niższe wartości temperatury i nacisku, po czym obserwowano wytrzymałość połączenia na ścinanie. Jako kryterium struktury oceny technologii przyjęto wielkość naprężeń ścinających struktury HEMT z podłoża DBC w teście ścinania.



Rys. 1. Schemat procesu montażu struktur HEMT do podłoża DBC w technologii SLID oraz zgrzewania mikroproszkiem Ag

Dodatkową ocenę prowadzono w oparciu o mikroskopową obserwację powierzchni ścinania. W celach porównawczych badanych układów metalizacji do montażu przyjęto dla procesu SLID następujące warunki: temperatura 280°C, czas 30 minut, nacisk 4 MPa. Z kolei dla procesu zgrzewania ustalono wartości tych parametrów odpowiednio: 350°C, 30 minut, 7,5 MPa.

#### Opis i dyskusja wyników dotyczących technologii SLID

W badaniach oceniano dwie technologie montażu struktur HEMT do podłoża DBC: technologie SLID oraz technologię zgrzewania mikroproszkami Ag. W obu przypadkach jako materiał łączeniowy stosowano mikroproszek Ag (Amepox AX20LC) typu „płatki” o rozmiarach z zakresu 3-8 mikrometrów.

Tabela 1. Adhezja chipów z tranzystorami HEMT AlGaIn/GaN na Si montowanych do podłoża DBC metalizowanych warstwą Sn w technologii SLID; wyniki naprężenia uzyskane w testach ścinania dla różnych metalizacji montażowych na spodzie chipów HEMT.

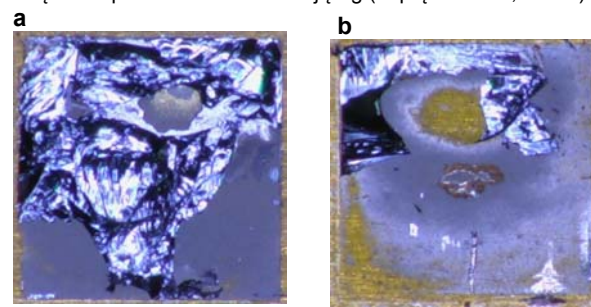
| Warstwa galwaniczna | Adhezja chipu z warstwą Cu | Adhezja chipu z warstwą Ag | Adhezja chipu z warstwą Au |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Sn 1 μm             | > 23 MPa                   | >23 MPa                    | >22 MPa                    |
| Sn 2 μm             | 17,5 MPa                   | 11,8 MPa                   | 14,6 MPa                   |

W technologii SLID opartej na Sn istotny wpływ na parametry użytkowe warstwy łączącej ma grubość Sn, bowiem od niej bezpośrednio zależy grubość warstw związków międzymetalicznych [8]. Stopiona warstwa Sn reaguje z Cu na podłożu DBC, powstają związki międzymetaliczne Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> oraz Cu<sub>3</sub>Sn, a także Sn reaguje z mikroproszkiem Ag (Ag<sub>3</sub>Sn) oraz może zmniejszać porowatość warstwy mikroproszku Ag wypełniając luki między płatkami Ag. Dlatego też w badaniach stosowano podłoża DBC z warstwą Sn o różnej grubości tj. 1 μm i 2 μm. Proces łączenia SLID prowadzono w temperaturze 280°C przez 30 minut pod naciskiem 4 MPa. Stosowanie nacisku powinno pozwolić nie tylko na lepsze wnikanie ciekłej Sn w chropowate powierzchnie łączonych elementów, ale także zmniejszyć porowatość łączącej warstwy mikroproszku Ag. W tabeli 1 zebrano wyniki naprężenia wyliczone z pomiarów siły ścinania połączeń. Najwyższe siły ścinania, tj. >23 MPa, zarejestrowano dla chipów tych zmontowanych do podłoża z warstwą Sn grubości 1 μm. Z kolei porównując wyniki testów dla połączeń do DBC z pokryciem warstwą (2 μm)Sn obserwuje się największe naprężenie 17,5 MPa dla chipu z metalizacją montażową Cu. Wynik ten może mieć źródło w obecności

faz międzymetalicznych utworzonych z Sn i z miedzi po obu stronach łączonych metalizacji, które dają większy wkład do sił połączeń niż wnoszą je fazy stopów Au-Sn czy Ag-Sn. Układ ten złożony z 3 lub 4 metali jest skomplikowany, wymaga dalszych badań występujących w nim faz oraz szczegółowej analizy składu.



Rys. 2. Powierzchnia ścinania na podłożu DBC z (2 μm)Sn po ścięciu chipu HEMT z metalizacją Ag (naprężenie 11,8 MPa).



Rys. 3. Powierzchnia podłoża DBC z metalizacją Au (a) - po ścięciu chipu HEMT z metalizacją Cu (naprężenie ścinające 17,5 MPa), (b) - po ścięciu chipu HEMT z metalizacją Au (naprężenie ścinające 14,6 MPa).

Przeprowadzone obserwacje pokazują, że montaż chipów wykonany na podłożach DBC z warstwą Sn o grubości 2 μm daje gorsze właściwości mechaniczne połączeń, niż dla chipów montowanych na podłożach z warstwą Sn grubości 1 μm. Najprawdopodobniej jest to związane z grubością warstw międzymetalicznych Cu-Sn, jakie powstają w obszarze łączenia między galwaniczną warstwą Sn a warstwą Cu na podłożu DBC [8]. Obserwacje optyczne powierzchni przeprowadzone po testach ścinania wskazują, że uszkodzenie połączenia następuje przede wszystkim na powierzchni między mikroproszkiem Ag a podłożem DBC. Na Rys. 2 pokazano fotografię powierzchni podłoża DBC z 2 μm metalizacją Sn po teście ścinania struktury HEMT z montażową metalizacją Ag, gdzie

widoczne jest całkowite i jednorodne oddzielenie chipu HEMT z metalizacją od podłoża DBC. Kolejne fotografie przedstawiają powierzchnię podłoża DBC z metalizacją Au po ścięciu chipu HEMT z metalizacją Cu - Rys. 3a, powierzchnię podłoża DBC z metalizacją Au po ścięciu chipu HEMT z metalizacją Au - Rys. 3b. Na tych powierzchniach są także widoczne fragmenty oderwane ze spodniej metalizacji struktury HEMT.

### Opis wyników z badań nad technologią zgrzewania mikroproszkami Ag

W technologii zgrzewania mikroproszkami Ag istotny wpływ na adhezję mają parametry procesu łączenia, tj. temperatura, czas oraz nacisk. W procesie montażu stosowano temperaturę 350°C, dla zwiększenia ruchliwości atomów powierzchniowych łączonych powierzchni, a także zwiększony do 7,5 MPa nacisk, który powinien poprawić kontakt między płatkami mikroproszku Ag, umożliwić dobre przyleganie płatków Ag do łączonych powierzchni i ułatwić ich zgrzewanie. Dobór siły nacisku ma poważne ograniczenia związane z ryzykiem mechanicznego uszkodzenia struktur HEMT wytworzonych na kruchym podłożu Si. W procesach łączenia wykorzystano struktury HEMT z różnymi metalizacjami: Cu, Ag lub Au, oraz podłoża DBC z metalizacjami Ag lub Au, co pokazano schematycznie na Rys. 1. Obszary łączenia ze strukturami HEMT to pary materiałów Cu/Ag, Ag/Ag oraz Au/Ag, a w obszarze podłoża DBC to pary materiałów Ag/Ag oraz Ag/Au. Na styku wymienionych par materiałów nie powstają związki międzymetaliczne, a połączenie może nastąpić na skutek samodyfuzji (połączenia Ag/Ag) lub dyfuzji wzajemnej związanej z rozpuszczalnością w stanie stałym (pary Cu/Ag, Au/Ag). W Tab. 2 zebrano wyniki pomiarów adhezji struktur HEMT z metalizacjami Cu, Ag lub Au do podłoża DBC z metalizacjami Ag lub Au.

Struktury HEMT z metalizacjami Cu, Ag lub Au montowane do podłoża DBC z metalizacją Ag poprzez warstwę mikroproszku Ag cechuje bardzo dobra adhezja. W żadnej próbie nie stwierdzono uszkodzenia połączenia adhezyjnego struktura-podłoże, najczęściej następowały kruche pęknięcia w obszarze Si, a samo połączenie pozostawało nienaruszone. Nie zaobserwowano żadnych pęknięć kohezyjnych w obszarze mikroproszku Ag. Te struktury, które nie uległy uszkodzeniu w teście ścinania mają adhezję lepszą niż 22 MPa.

Tabela 2. Adhezja chipów z tranzystorami HEMT AlGaN/GaN na Si montowanych do podłoża DBC metalizowanych warstwą Sn w technologii zgrzewania mikroproszkiem Ag - naprężenia uzyskane w testach ścinania dla różnych metalizacji montażowych na strukturze HEMT. Symbol \* - oznacza, że połączenie nadal istnieje, a uszkodzeniu uległa krawędź Si, która „ukruszyła się”.

| Warstwa na podłożu DBC | Adhezja chipu z warstwą Cu | Adhezja chipu z warstwą Ag | Adhezja chipu z warstwą Au |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Ag 2 μm                | ~19 MPa*                   | >25 MPa                    | >22 MPa                    |
| Ni 3 μm/Au 1 μm        | 21 MPa*                    | >23 MPa                    | 13,5 MPa                   |

Struktury HEMT z metalizacjami Cu, Ag lub Au montowane do podłoża DBC z metalizacją Au poprzez warstwę mikroproszku Ag cechuje dobra adhezja. W strukturach HEMT z metalizacją Cu występowały kruche pęknięcia w obszarze krawędzi podłoża Si, oraz częściowe oddzielenie chipu HEMT od warstwy mikroproszku Ag. Nie zaobserwowano żadnych pęknięć kohezyjnych w obszarze mikroproszku Ag. W strukturach HEMT z metalizacją Au montowanych na podłożach DBC z metalizacją Au zaobserwowano słabszą adhezję. W tym przypadku występuje mieszany mechanizm uszkodzenia, pewne

fragmenty Si pozostały związane z podłożem DBC, w większości nastąpiło ścięcie ze złotej metalizacji na podłożu DBC lub z powierzchni Au na chipie HEMT. Wyjaśnienie tego obniżenia siły wymaga dalszych badań.

Podsumowując wyniki badań można stwierdzić, że w przypadku technologii SLID celowe jest stosowanie podłoża DBC z naniesioną 1 mikrometrową warstwą Sn. Natomiast sam proces łączenia należy prowadzić w temperaturze 280°C z dobranym naciskiem ok. 4 MPa. Bardzo dobrą adhezję uzyskuje się dla wszystkich zastosowanych metalizacji montażowych struktur HEMT. Można rozważyć skrócenie czasu procesu, aby zmniejszyć narażenia cieplne związane z procesem montażu.

W przypadku stosowania technologii zgrzewania struktur HEMT mikroproszkiem Ag proces montażu należy prowadzić w wyższej temperaturze, 350°C, i jednocześnie przy zwiększonym nacisku. W testach ścinania połączeń nie stwierdzono utraty adhezji między metalizacjami struktur HEMT a mikroproszkiem Ag, natomiast w kilku próbach ścinania stwierdzono zerwanie połączenia na granicy mikroproszku Ag a złożoną metalizacją podłoża DBC lub metalizacją Au na strukturze HEMT. Dla monometalicznego układu połączeń z Ag adhezja chipów jest najlepsza, naprężenie ścinania jest powyżej 25 MPa.

*Praca była finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, nr umowy TECHMATSTRATEG 1/346922/4/NCBR/2017, projekt pt. „Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości”.*

**Autorzy:** dr hab. inż. Ryszard Kisiel, Politechnika Warszawska, Instytut Mikro- i Optoelektroniki ul. Koszykowa 75, Warszawa, [kisiel@imio.pw.edu.pl](mailto:kisiel@imio.pw.edu.pl); dr hab. inż. Mariusz Sochacki, Politechnika Warszawska, Instytut Mikro- i Optoelektroniki ul. Koszykowa 75, Warszawa, [msochack@elka.pw.edu.pl](mailto:msochack@elka.pw.edu.pl); dr inż. Andrzej Taube, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/4, 02-668 Warszawa, [ataube@ite.waw.pl](mailto:ataube@ite.waw.pl); dr hab. inż. Marek Guziewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa, [marqu@ite.waw.pl](mailto:marqu@ite.waw.pl)

### LITERATURA

- [1] Chang T-Ch, Chang J-Y., Chung T-H. and W-Ch.Lo, Dual-phase solid-liquid interdiffusion bonding, a solution for the die attachment of WBG, *IEEE* (2012), 978-1-4673-4944-4
- [2] Larson A., Tollefsen T.A., Liquid Solid Diffusion (LSD) Bonding, *IMAPS/EMPC 2017 Conf. Proc.* Warsaw, Poland
- [3] Kisiel R., Mysliwiec M., Solid-Liquid Interdiffusion Bonding Based on Au-Sn Intermetallic for High Temperature Applications, *41st International Spring Seminar on Electronics Technology Conf. Proc.* ISSE, Zlatibor (2018), 1-5
- [4] Mysliwiec M., Kisiel R., Applying Sintering and SLID Bonding for Assembly of GaN Chips Working at High Temperatures, *7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, Dresden (2018), 1-5
- [5] Siow K.S., Are Sintered Silver Joints Ready for use as Interconnect Material in Microelectronic Packaging?, *Journal of Electronic Materials*, (2014) DOI:10.1007/s11664-013-2967-3
- [6] Chua S.T., Siow K.S., Microstructural studies and bonding strength of pressureless sintered nano-silver joints on silver, direct bond copper (DBC) and copper substrates aged at 300°C, *Journal of Alloys and Compounds*, 687 (2016), 486-498
- [7] Yeom J., Li C-F., Suganuma K., Sintering mechanism of micron/submicron-size silver particles, *ICEP-IAAC 2018 Proc.*, TC3-4 (2018), 121-123
- [8] Lemettre S., Isac N., Hammami S., Seok S., Moulin J., Bosseboeuf A., Alphonse P., Detection of Liquefaction by DSC for Cu-Sn TLP Bonding, *IEEE 2018, 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, San Diego, CA (2018), 568-573