

Technologia SLID w montażu GaN-on-Si do podłoża Cu

Analizowano proces montażu chipów GaN-on-Si do podłoża Cu w oparciu o pasty Ag. Wykorzystano dwa zjawiska: zgrzewania dyfuzyjnego do połączenia między metalizacją montażową chipu Si i pastą Ag oraz zjawisko dyfuzji w fazie ciekłej (SLID – Solid-Liquid Interdiffusion) do połączenia między podłożem Cu a warstwą pasty Ag. Stosowano jeden profil temperaturowy: suszenie 70 °C&10min+ SLID 250 °C&5min oraz dyfuzję w fazie stałej 200 °C&60min. Uzyskano połączenie o dobrej adhezji (powyżej 10 MPa) oraz zadowalającej rezystancji cieplnej (ok. 0,05 K/W).

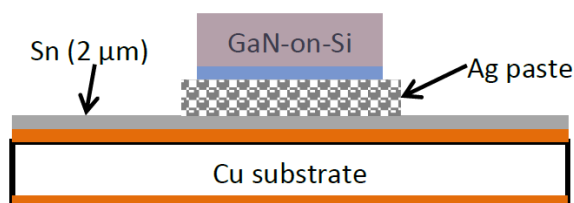
The application of SLID technology for the assembly of GaN-on-Si chips on Cu substrate using Ag paste is considered. The assembly process is based on: sintering for creation interface between Au metallization on Si chips and Ag paste as well as SLID process for creation interface between Ag paste and Cu substrate with Sn metallization. One temperature profile was applied: drying (70 °C&10min) + SLID (250 °C&5 min) + sintering (200 °C&60 min) in air. Connection is characterized by good adhesion (above 10 MPa) and low thermal resistance (0,05 K/W). (**SLID technology in assembly GaN-on-Si chips on Cu substrate**)

Słowa kluczowe: technologia SLID, montaż GaN-on-Si, Ag sintering, rezystancja cieplna

Keywords: SLID technology, GaN-on-Si assembly, Ag sintering, thermal resistance

Wstęp

Celem artykułu jest badanie procesu montażu chipów GaN-on-Si do podłoża wykonanych z Cu z wykorzystaniem past opartych na mikroproszkach Ag. Połączenia montażowe oparte na mikroproszkach Ag powinny cechować się lepszą przewodnością cieplną niż połączenia oparte na lutach oraz pozwalać na pracę w znacznie wyższych temperaturach eksploatacji [1-4]. Idee formowania tego typu połączenia pokazano na Rys.1.



Rys.1 Idea formowanego połączenia typu SLID

Opiera się ona na wykorzystaniu następujących procesów:

- sinteringu (zgrzewania) do uformowania połączenia między montażową metalizacją chipa (zwykle stanowi je metalizacja Au) oraz warstwą mikroproszku Ag. W trakcie tego procesu zachodzi dodatkowo zgrzewanie między ziarnami mikroproszku Ag. Procesy te odpowiadają za adhezję między metalizacją chipa a warstwą mikroproszku Ag a także zapewniają połączenia między kontaktującymi się ziarnami mikroproszku Ag. Im wyższa temperatura procesu, oraz większy nacisk, tym lepsze są warunki do formowania połączenia.

- SLID (Solid Liquid InterDiffusion) do połączenia między warstwą Sn na podłożu Cu a warstwą mikroproszku Ag. Montaż tego typu musi być prowadzony w temperaturach przewyższających temperaturę topnienia Sn. W trakcie procesu ciekła Sn łączy się z Cu formując fazy międzymetaliczne Sn/Cu a ponadto tworzą się fazy międzymetaliczne Sn/Ag z proszkiem Ag zawartym w paście. Procesy te odpowiadają za zapewnienia połączenia między galwaniczną warstwą Sn a podłożem Cu oraz połączenia między Sn a warstwą mikroproszku Ag poprzez ciekłą warstwę Sn. Warto w tym miejscu podkreślić, że ciekła Sn może penetrować w warstwę mikroproszku Ag zmniejszając porowatość tej warstwy [7]. O skuteczności tego procesu decyduje temperatura oraz wzajemne zbliżenie łączonych elementów oraz zwilżalność Sn na podłożu Cu oraz na proszku Ag.

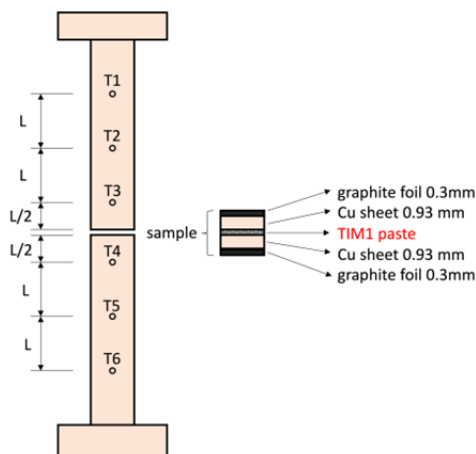
W pracach [4,6,8] dokładniej opisano zjawiska jakie zachodzą między metalizacją montażową Au, Ag lub Cu na chipie Si oraz metalizacjami Sn, Ag lub Au na podłożu montażowym Cu z wykorzystaniem warstwy łączącej w postaci mikroproszku Ag bez dodatku żywicy. W montażu wykorzystano wspomniane już technologie sinteringu oraz SLID. W technologii sinteringu formowane było połączenie między metalizacjami montażowymi z Cu, Ag lub Au na chipie oraz metalizacjami Ag lub Au na podłożu Cu z wykorzystaniem mikroproszku Ag. W pracy [4,6] wykazano, że wzajemne połączenia między w/w metalizacjami formowane są na drodze wzajemnej dyfuzji Cu/Ag, Ag/Au lub samodyfuzji Ag/Ag. Prawidłowe uformowanie takich połączeń wymaga podwyższonych temperatur (350°C) i podwyższonych nacisków (co najmniej 10 MPa). Połączenia typu SLID formowano między warstwą Sn na podłożu Cu a warstwą mikroproszku Ag. W badaniach strukturalnych wykazano, że w takim przypadku połączenie formowane było poprzez fazy międzymetaliczne Cu/Sn (Cu₃Sn, Cu₆Sn₅) z podłożem Cu oraz poprzez fazę Ag₃Sn z warstwą mikroproszku Ag [8]. Dodatkowo z badań strukturalnych zamieszczonych w pracy [4,6] wynika, że Sn penetruje głęboko w warstwę mikroproszku Ag, zmniejszając porowatość warstwy z mikroproszku Ag. Proces SLID można prowadzić przy mniejszych naciskach (ok. 4 MPa) niż proces sinteringu.

Celem niniejszego artykułu jest badanie procesu montażu struktur GaN-on-Si do podłoża Cu metalizowanych warstwą Sn (technologia SLID) z wykorzystaniem pasty Ag przeznaczonych do sinteringu, składającej się z mikroproszku Ag oraz żywicy (90%wg Ag+10% wg żywicy, pasta TIM AT, AMEPOX Microelectronics, Poland). Wykorzystanie pasty Ag zawierającej żywicę pozwala na prowadzenie montażu przy znacznie zmniejszonych naciskach w trakcie montażu. Nacisk w trakcie montażu jest krytycznym narażeniem dla cienkich i kruchych chipów GaN-on-Si. Obecność żywicy w paście powinna poprawić adhezję do łączonych części, niestety może to pogorszyć parametry cieplne warstwy łączącej. Zdecydowano, aby prowadzić dwa typy montażu: „pressureless” w trakcie którego nacisk ok. 0.1 MPa stosowano przy wciskaniu chipu w nieutwardzoną pastę Ag, a sam proces łączenia prowadzono bez nacisku, oraz proces „pressure” gdzie stosowano nacisk do 0.1 MPa przy wciskaniu chipu w pastę oraz naciski do 2 MPa w trakcie procesu montażu.

Część doświadczalna

Wykonano dwa rodzaje próbek do badań: jedne do badań właściwości mechanicznych (adhezja) oraz drugie do badań właściwości cieplnych połączenia montażowego między podłożem Cu z metalizacją Sn a tzw. „dummy chip” ze spodnią metalizacją Au poprzez pastę TIM AT w technologii SLID (do pomiaru R_{th} połączenia). Pasta TIM AT to mieszanina mikro płatków Ag o rozmiarach 1-3µm (90%wg) z żywicą (10%wg) wykonana w firmie AMEPOX Poland. Podłoże montażowe wykonano z blachy Cu: 10 mm x 25 mm o grubości 0.93 mm jednostronnie pokrytej warstwą galwanicznej Sn o grubości 2 µm. Tzw. „dummy chip” stanowiły próbki z ceramiki DBC z warstwą montażową Ni(3µm)Au(1µm) o wymiarach 3mm x 3 mm. Pod każdy z 4 „dummy chip” z ceramiki DBC naniesiono po 5 kropli pasty TIM AT (masa kropli ok 0.2 mg). Następnie chip DBC układano na paście TIM AT przy nacisku ok 0.1 MPa i prowadzono proces SLID stosując profil: 70°C&10min suszenie+250°C&5 min (SLID)+200°C&60 min (sintering) bez żadnego nacisku (pressureless) lub proces z naciskiem 0.6 lub 1 MPa (pressure). Adhezję badano w teście ścinania zgodnie ze standardem IPC-TM-650.

Próbki do badań cieplnych przygotowano w sposób następujący: na podłoże Cu z warstwą Sn o wymiarach 10mm x 10 mm, nanoszono 13 kropli pasty TIM AT, po czym na pastę układano „dummy chip” z Cu z metalizacją Ni/Au o wymiarach 10 mm x 10 mm. Przy układaniu chipu w pastę stosowano nacisk 0,05 MPa. Sam proces łączenia prowadzono według profilu: 70°C&10min suszenie+250°C&5 min (SLID)+200°C&60 min (sintering) (ozn. PROFIL SLID) stosując nacisk 0,6 MPa lub 2 MPa w trakcie łączenia (proces pressure). Pomiar cieplny prowadzono metodą porównawczą, umieszczając badaną próbkę między dwoma prostopadłościanami z Cu o przekroju 10 mm x 10 mm, Rys.2. Kontrolując strumień ciepła płynący przez badaną próbkę oraz spadki temperatur na krańcach próbki można oszacować rezystancję cieplną badanej próbki. Jako próbki odniesienia stosowano próbkę z blachy Cu o wymiarach 10 mm x 10 mm x 0,93 mm oraz próbkę z dwóch blach Cu o wymiarach 10 mm x 10 mm x 0,93 mm z metalizacjami Ni/Au zlutowanych pastą SAC(SnAgCu).



Rys.2 Schemat stanowiska do badań cieplnych

Wyniki badań oraz ich analiza

Wyniki pomiarów adhezji tzw. „dummy chip” z podłożem Cu z metalizacją Sn wykonanych w technologii SLID z wykorzystaniem pasty TIM AT w dwóch wariantach; „pressureless” oraz „pressure” zebrano w Tab.1.

W wersji „pressureless” adhezja tuż po otrzymaniu jest rzędu 3÷4 MPa, w wersji „pressure” przekracza 10 MPa. Warto podkreślić, że minimalna adhezja takich struktur

powinna przekraczać 5 MPa (wymagania normy MIL 883). Zatem do wykonania poprawnych połączeń adhezyjnych niezbędne jest wywarcie nacisku w trakcie łączenia co najmniej 0,6 MPa. Tak niewielki nacisk nie powinien wpływać destrukcyjnie na łączone chipy GaN-on-Si. Dalsze zwiększanie nacisku w trakcie łączenia do 1 MPa pozwoliło na zauważalne poprawienie adhezji.

Wyniki pomiarów cieplnych połączenia typu SLID między podłożem Cu z metalizacją Sn a „dummy chip” wykonanych z Cu z metalizacją Ni/Au zebrano w Tab.2.

Tabela 1. Wyniki pomiarów adhezji tzw. „dummy chip” z metalizacją Ni/Au a podłożem Cu z metalizacją Sn wykonanych w technologii SLID z wykorzystaniem pasty TIM AT

| Profil temperaturowy | Nacisk | Grubość | Adhezja |
|----------------------|---------|---------|--------------|
| Suszenie | brak | 40µm | 3,4±0,4 MPa |
| 70°C&5min+ SLID | brak | 30µm | 3,7±0,5 MPa |
| 250°C&5min | 0,6 MPa | 30µm | 12,3±2,5 MPa |
| +200°C&60 min | 1 MPa | 30µm | 14,2±2,0 MPa |

Tab.2 Rezystancja cieplna połączeń typu SLID między podłożem Cu z metalizacją Sn a dummy chip z Cu z metalizacją Ni/Au.

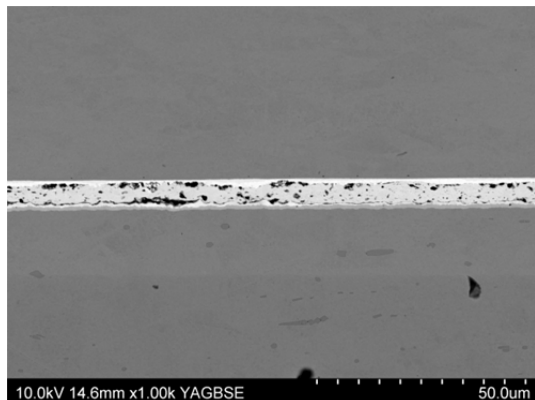
| Podłoże | Chip | Profil Nacisk | R_{th} [K/W] | | |
|------------------------|------------|-----------------------------|----------------|------|------|
| | | | 1h | 2h | 3h |
| Cu, próbka odniesienia | | | | | |
| Cu z Sn | Cu z Ni/Au | 250°C&30 s, lutowanie, brak | 2,06 | 2,06 | 2,06 |
| Cu z Sn | Cu z Ni/Au | PROFIL SLID, 0,5 MPa | 2,12 | 2,11 | 2,12 |
| | | PROFIL SLID, 2,0 MPa | 2,08 | 2,07 | 2,08 |

PROFIL SLID- 70°C&10min suszenie+250°C&5 min (SLID)+200°C&60 min (sintering)

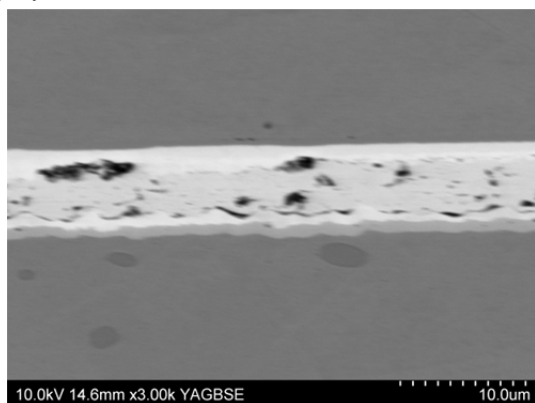
Dla porównania tą samą metodą i na tym samym stanowisku badawczym zmierzono rezystancję cieplną blachy Cu o rozmiarach 10mm x 10 mm x 0,93 mm oraz rezystancję cieplną dwóch próbek z blachy Cu 10mm x 10 mm (z metalizacją Ni/Au) zlutowanych lutem SAC. Oba te pomiary wskazują, jaka jest „wewnętrzna” rezystancja cieplna stanowiska badawczego, na którą składają się rezystancja cieplna znanego materiału oraz dwie rezystancje cieplne styku badanego materiału do miedzianych prostopadłościanów między którymi umieszczana jest badana próbka. Dla ujednorodnienia rezystancji cieplnych styku, stosowano powtarzalną siłę ściskania oraz wprowadzono przekładki z folii grafitowej. Zbadanie parametrów cieplnych próbki z blachy Cu pozwala oszacować „wewnętrzną” rezystancję cieplną stanowiska na 2,05 K/W. Rezystancja cieplna próbki zlutowanej lutem SAC jest nieznacznie większa i wynosi ok. 2,06 K/W. Ten wzrost rezystancji cieplnej wynika z budowy próbki, dodany jest tzw. „dummy chip” z Cu oraz warstwa lutu SAC. Próbka wykonana w technologii SLID pod naciskiem 0,5 MPa ma rezystancję cieplną ok. 2.11 K/W, a więc o 0,05 K/W większą niż próbka zlutowana lutem SAC. Zwiększenie siły docisku do 1 MPa zmniejsza tę różnicę do 0,02 K/W (2,08 K/W–2,06 K/W). Potwierdza się tym samym, że zastosowanie nacisku 2 MPa w trakcie procesu SLID zdecydowanie zmniejsza rezystancję cieplną połączenia oraz poprawia adhezję, co może wynikać z zagęszczoną warstwą łączącej jak i nieco mniejszej grubości. Sumując powyższą analizę, można stwierdzić, że rezystancja cieplna połączenia typu SLID między podłożem Cu z metalizacją Sn a dummy chip z metalizacją Au wykonanego pastą TIM AT jest większa niż próbek zlutowanych lutem SAC o co najmniej 0,05 K/W.

Dla wyjaśnienia różnicy w rezystancjach cieplnych próbek wykonanych w technologii SLID oraz próbek zlutowanych lutem SAC wykonano przekrój przez próbkę

SLID wykonaną przy nacisku 2 MPa, Rys. 3 i Rys.4. Warstwa łącząca cechuje się zauważalną porowatością, szczególnie na powierzchniach między pastą TIM AT a łączonymi powierzchniami. Na Rys. 4 widać najprawdopodobniej cienką warstwę związków międzymetalicznych CuSn gwarantujących dobrą adhezję do podłoża Cu. Środek warstwy łączącej charakteryzuje się dużą zwartością, nie widać w niej płatków Ag (które są podstawowym składnikiem pasty).



Rys.3 Przekrój przez próbkę wykonaną w technologii SLID pasta TIM AT przy nacisku 2 MPa, przy powiększeniu 1000X, mikroskop skaningowy Hitachi SU-70

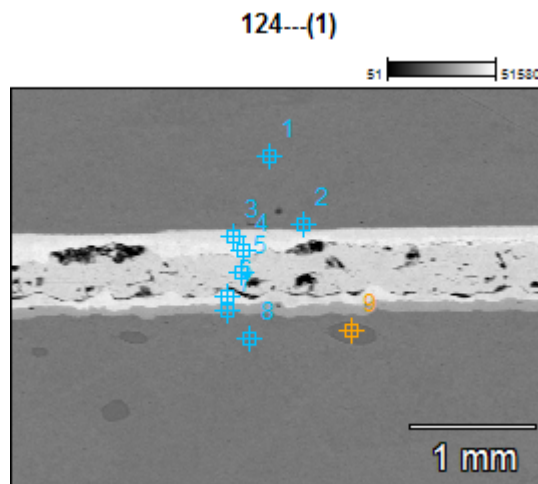


Rys.4 Przekrój przez próbkę wykonaną w technologii SLID pasta TIM AT przy nacisku 2 MPa, przy powiększeniu 3000X, Mikroskop skaningowy Hitachi SU-70

Bardziej dokładną analizę parametrów połączenia typu SLID oparto o analizę budowy i składu chemicznego połączenia typu SLID, Rys.5. Analiza wskazuje, że na pograniczu Cu z metalizacją Sn widać szarą warstwę związków międzymetalicznych CuSn (pt7, Tab.3). Następuje wyraźna dyfuzja Sn w warstwę łączącą z pasty TIM AT (pt3-pt6, Tab.3). Można postawić hipotezę, że nadmiar ciekłej Sn w pierwszej fazie łączenia dyfunduje w warstwę mikroproszku Ag i zapewnia wzajemne połączenie mikroplatków Ag. Zaobserwowano także dyfuzję Au do warstwy mikroproszku Ag (pt3-pt7). Oba te procesy zmniejszają porowatość warstwy łączącej, pustki w warstwie łączącej mogą być wynikiem działania podwyższonej temperatury i usunięcia (wypalenia) żywicy w procesach sinteringu oraz SLID. Dalsze prace nad technologią SLID będą prowadzone pod kątem zmniejszenia porowatości warstwy łączącej.

Porównując R_{th} próbek lutowanych lutem SAC oraz pastą TIM AT warto jednak podkreślić, że rzeczywiste maksymalne temperatury eksploatacji połączeń lutowanych lutami SAC nie powinny przekraczać 120-150°C, natomiast temperatury pracy połączeń typu SLID (opartych na warstwie Sn i paście TIM AT) mogą sięgać nawet 300°C.

Dlatego technologia SLID może być bardzo przydatna dla elektroniki mocy.



Rys.5 Przekrój przez warstwę łączącą z zaznaczeniem punktów pomiarowych składu chemicznego (nacisk 2 MPa, $R_{th}=2.08$ K/W), mikroskop skaningowy Hitachi SU-70

Tab.3 Skład chemiczny (% wg.) wykonany techniką energorozdzielczej spektroskopii promieniowania rentgenowskiego EDS w poszczególnych punktach pomiarowych pokazanych na Rys. 5

| Punkt No | Procent wagowy poszczególnych pierwiastków | | | | | |
|----------|--|------|-------|------|------|------|
| | O | Ni | Cu | Ag | Sn | Au |
| 1 | | | 100,0 | | | |
| 2 | | | 100,0 | | | |
| 3 | | 17,0 | | | 60,1 | 22,8 |
| 4 | | 10,4 | | | 51,6 | 38,0 |
| 5 | | | 1,8 | 67,3 | 25,6 | 5,3 |
| 6 | | | 25,6 | | 45,4 | 29,0 |
| 7 | | | 69,2 | | 28,0 | 2,8 |
| 8 | | | 100,0 | | | |
| 9 | 8,1 | | 91,9 | | | |

Wnioski

W badaniach analizowano zalety i ograniczenia technologii SLID do montażu tzw. „dummy chips” z metalizacją Ni/Au do podłoża Cu z metalizacją Sn. Proces montażu chipów z metalizacją Ni/Au poprzez pastę Ag TIM AT polegał na wykorzystaniu dwóch procesów: tzw sinteringu do formowania połączenia między metalizacją Au na chipie Si a pastą Ag oraz procesu SLID do formowania połączenia między pastą Ag a metalizacją Sn na podłożu Cu. Zdecydowano, aby do realizacji obu procesów wykorzystać jeden profil temperatury: suszenie 70°C&10 min + SLID 250°C&5 min + sintering 200°C &60 min w powietrzu. Montaż prowadzono w dwóch wariantach „pressureless” oraz „pressure” (do 2 MPa). Oceny jakości połączeń dokonano w oparciu o dwa kryteria: adhezji tuż po otrzymaniu oraz rezystancji cieplnej połączenia. Badania potwierdzają, że dla otrzymania połączeń o dobrej adhezji i dobrych parametrach cieplnych konieczne jest stosowanie nacisków co najmniej 1 MPa. Dwukrotne zwiększenie nacisku do 2 MPa zdecydowanie poprawia parametry cieplne połączeń typu SLID (rezystancja cieplna połączenia SLID może być zdecydowanie zmniejszona do wartości ok. 0,02 K/W).

Podziękowanie

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 821963, project title: "New generation of high thermal efficiency components packages for space" Project officers Mr Andrej Rozkov and Mr Fabio Vitobello, www.heatpack.eu

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Kisiel, Politechnika Warszawska, Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, E-mail: kisiel@imio.pw.edu.pl; dr inż. Piotr Śpiewak, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, E-mail: Piotr.spiewak@pw.edu.pl; dr inż. Mirosław J. Kruszewski, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, E-mail: miroslaw.kruszewski@pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Aasmundtveit K.E., et al "Solid-Liquid InterDiffusion (SLID) Bonding, for Thermally Challenging Applications" *2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, DOI 10.1109/ECTC.2019.00029, 141-148
- [2] Yu. F., et al "Reliability of Ag Sintering for Power Semiconductor Die Attach in High Temperature" *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol.32, No 9, September 2017, DOI:10.1109/TPEL.2016.2631128
- [3] Chew L.Ch., Schmitt W.: High reliable silver sintered joint on copper lead frame by pressure sintering process" *IWIPP IEEE conference*,(2019) *IEEE*, DOI:10.1109/IWIPP.2019.8799094, 44-47
- [4] Xin Y.L., et al "Pressureless Low Temperature Sintering Paste for NiAu PCB Substrate" *18th EPTC Conference, IEEE (2016)*, 978-1-5090-4369-9/16
- [5] Kisiel R., Mysliwiec M.: "Solid-Liquid Interdiffusion Bonding Based on Au-Sn Intermetallic for High Temperature Applications" *Proc. Of ISSE Conference 2018 Zlatibor*, (2018) Serbia, DOI:10.1109/ISSE.2018.8444132
- [6] Mysliwiec M., Kisiel R.: "Applying Sintering and SLID Bonding for Assembly of GaN Chips Working at High Temperatures" *7th ESTC Conference, Dresden*, (2018), DOI:10.1109/ESTC.2018.8546475
- [7] Myśliwiec M, Kisiel R.: "Development of SLID Bonding Technology for GaN Assembly Based on Ag Microflakes" *Proc. of ISSE Conference (2019) Wrocław, Poland*, DOI:10.1109/ISSE.2019.8810261
- [8] Kisiel R., Guziewicz M., Taube A., Kamiński M., Sochacki M.: "Development of Assembly Techniques for Connection of AlGaIn/GaN/Si Chips to DBC Substrate" *Circuit World*, DOI:10.1108/CW-12-2019-0186, in printing