

Analiza elektrotermiczna obudowy zintegrowanej ze strukturą mikrokanałową dla pastylkowych przyrządów półprzewodnikowych mocy

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki trójwymiarowych elektrotermicznych symulacji numerycznych obudowy zintegrowanej ze strukturą mikrokanałową opracowanej dla pastylkowych przyrządów mocy. Przeprowadzona analiza potwierdziła, iż nowe rozwiązanie nawet zaimplementowane jako chłodzenie jednostronne jest w stanie zapewnić niższe temperatury pracy elementów krzemowych, jednakże rozkład temperatury w pastylce półprzewodnikowej jest bardzo nierównomierny.

Abstract. The paper presents results of three dimensional electrothermal numerical simulations of a package integrated with microchannel structure for disc type power semiconductor devices. The conducted analysis has confirmed, that the new solution, even with implemented single-sided cooling, is able to maintain lower operating temperature of a silicon device; although, it offers also a higher non-uniformity of temperature distribution within semiconductor structure. (**Electrothermal analysis of a package integrated with microchannel structure for disc type power semiconductor devices**).

Słowa kluczowe: mikrokanały, chłodzenie, dioda mocy, modelowanie.
Keywords: microchannel, cooling, power diode, modelling.

Wstęp

Rozwój elementów i systemów elektroniki nierozwalnie wiąże się z rozwojem układów chłodzenia. Nieustający wzrost wymagań odnośnie oferowanych parametrów elektrycznych oraz szybkości działania urządzeń [1] przekłada się na ilość generowanego ciepła. Nierzadko towarzyszą im dodatkowe ograniczenia odnośnie wagi oraz gabarytów rozwiązania co przekłada się na wysokie wartości gęstości strumienia ciepła, które w modułach mocy mogą przekroczyć 350 W/cm^2 [2, 3].

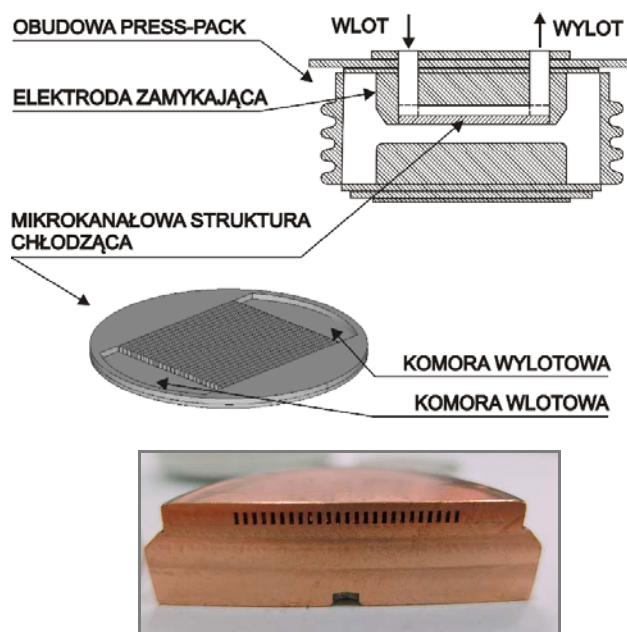
Najbardziej tradycyjną metodą chłodzenia przyrządów i układów elektronicznych są systemy chłodzenia powietrznego. Rozwiązania te bazują na różnych konstrukcjach radiatorów dołączanych do elementów elektronicznych. W przypadku, gdy gęstości strumienia ciepła przekraczają kilkadziesiąt W/cm^2 możliwości chłodzenia powietrznego mogą okazać się niewystarczające. Stosuje się wtedy cieczowe systemy chłodzenia oparte na radiatorach wodnych bądź płytach chłodzących, które umożliwiają efektywny transport mocy cieplnej z wnętrza struktury półprzewodnikowej charakteryzujący się wartościami przekraczającymi 250 W/cm^2 [2, 4]. Dalsze zwiększanie gęstości transportowanego strumienia ciepła, które jest oczekiwane przez współczesną elektronikę, jest możliwe dzięki wykorzystaniu koncepcji mikrokanałowych systemów chłodzenia, które osiągają efektywności odprowadzania ciepła przekraczającej nawet 500 W/cm^2 [2, 4-8].

Propozycję wykorzystania sieci kanałów o niewielkim wymiarze charakterystycznym po raz pierwszy przedstawili Tuckerman i Pease [6] w 1981 r. Bardzo duży potencjał tkwiący w tego typu rozwiązaniach zaowocował licznymi pracami poświęconymi zarówno mikrokanałowym płytom chłodzącym [5,6], jak i rozwiązaniom zintegrowanym [7-10].

Niniejsza publikacja poświęcona jest analizom elektrotermicznym diod mocy zamkniętych w obudowach zintegrowanych opracowanych przez autorów [5], w których mikrokanałowa struktura chłodząca wbudowana jest w elektrodę zasilającą. Przedstawione w pracy wyniki ilustrują rozkład temperatury oraz gęstości natężenia prądu w strukturze diodowej zamkniętej w nowej obudowie w porównaniu do rozwiązań konwencjonalnych wykorzystujących dwustronny system chłodzenia cieczowego.

Obudowa zintegrowana

Obudowa zintegrowana dla pastylkowych przyrządów półprzewodnikowych mocy [8, 10] została opracowana jako wysokoefektywne rozwiązanie pozwalające na poprawę parametrów elektrycznych oraz zmniejszenie gabarytów i ciężaru całego systemu poprzez wyeliminowanie zewnętrznych układów chłodzenia. Koncepcję obudowy przedstawiono na Rys. 1.



Rys.1. Schemat obudowy zintegrowanej oraz zdjęcie prototypowej elektrody zamykającej w przekroju w przykładzie wykonania [1]

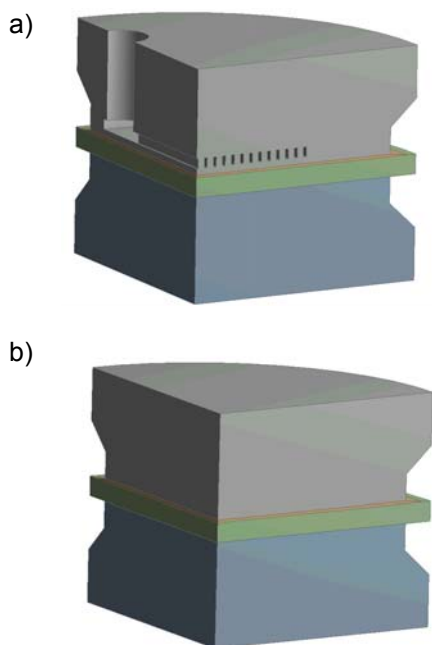
Mikrostruktura chłodząca wykonana jest w dysku miedzianym w postaci szeregu równoległych mikrokanalów o przekroju prostokątnym łączących komorę wlotową i wylotową. Następnie struktura ta jest montowana w gnieździe o kształcie cylindrycznym wykonanym w elektrodzie zamykającej obudowy typu press-pack, tak aby elementy wlotowe i wylotowe wraz z komorami i siecią mikrokanalów zapewniły tor przepływu medium chłodzącego. Rys. 1 przedstawia także zdjęcie w przekroju

poprzecznym elektrody zamykającej z wbudowaną mikrokanalową strukturą chłodzącą.

Koncepcja została zweryfikowana eksperymentalnie z wykorzystaniem rezystorów krzemowych oraz diod półprzewodnikowych mocy DB3-3500 (firmy Kubara Lamina) [8]. Wykonane pomiary potwierdziły, iż nowa obudowa jest w stanie zapewnić niższą temperaturę pracy struktury półprzewodnikowej, a co za tym idzie pozwala na uzyskanie lepszych parametrów elektrycznych dla elementu mocy nawet przy zastosowaniu chłodzenia jednostronnego w porównaniu z konwencjonalnym chłodzeniem dwustronnym opartym na płytach chłodzących [2, 8]. Jednakże, ze względu na nierównomierne pokrycie całej powierzchni elektrody przez sieć kanałów pojawiły się pytania odnośnie równomierności rozkładu temperatury oraz gęstości natężenia prądu w testowanej diodzie mocy. Badania zostały rozszerzone o symulacje numeryczne opracowanej obudowy.

Modelowana struktura

Geometrie modelowanych struktur obejmujących obudowę zintegrowaną oraz konwencjonalną obudowę typu press-pack pokazano na Rys. 2. Obejmują one pastylkę krzemowej diody półprzewodnikowej na molibdenowym podłożu zamkniętą między dwoma miedzianymi elektrodami. W przypadku obudowy zintegrowanej na Rys. 2a uwidoczniła jest także mikrokanałowa struktura chłodząca wraz z elementami doprowadzającymi ciecz. Analizy przedstawione w niniejszej pracy koncentrują się na jednej geometrii mikrostruktury zawierającej 25 kanałów o wymiarach 0,5 x 1,5 mm i długości 36,4 mm oddzielonych ściankami o grubości 1,0 mm. Modelowane fragmenty obejmują jedynie jedną czwartą całej badanej struktury ze względu na chęć przeprowadzenia analiz elektrotermicznych uwzględniających chłodzenie z wykorzystaniem konwekcyjnych warunków brzegowych bez symulacji rzeczywistego przepływu cieczy.



Rys. 2. Testowa struktura (a) zintegrowana z mikrokanalową strukturą chłodzącą (b) konwencjonalna

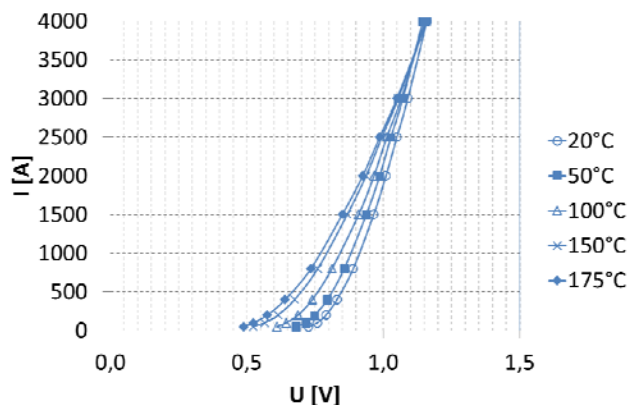
Chcąc opracować model elektrotermiczny, w pierwszym kroku na podstawie charakterystyk izotermicznych diod półprzewodnikowych DB3-3500 dla danej wartości natężenia prądu I wyznaczono rezystywność zastępczą struktury półprzewodnikowej $\rho(T)$ pozwalającej oddać

zmianę strat mocy w badanym elemencie w funkcji temperatury T .

$$(1) \quad \rho(T) = \frac{U(T)}{I} \cdot \frac{A}{d}$$

gdzie: $U(T)$ – napięcie na diodzie w zależności od temperatury, a A i d – wymiary diody odpowiadające polu przekroju poprzecznego struktury diodowej (wartość uśredniona) oraz jej grubości (400 μm).

Pomiary zostały przeprowadzone metoda impulsową dla szeregu struktur spolaryzowanych w kierunku przewodzenia. Przykładowe charakterystyki pokazano na Rys. 3.



Rys. 3. Charakterystyki izotermiczne diody DB3-3500

Szereg symulacji numerycznych dla stanu cieplnie ustalonego z wykorzystaniem pakietu ANSYS został przeprowadzony dla następujących założeń i warunków brzegowych:

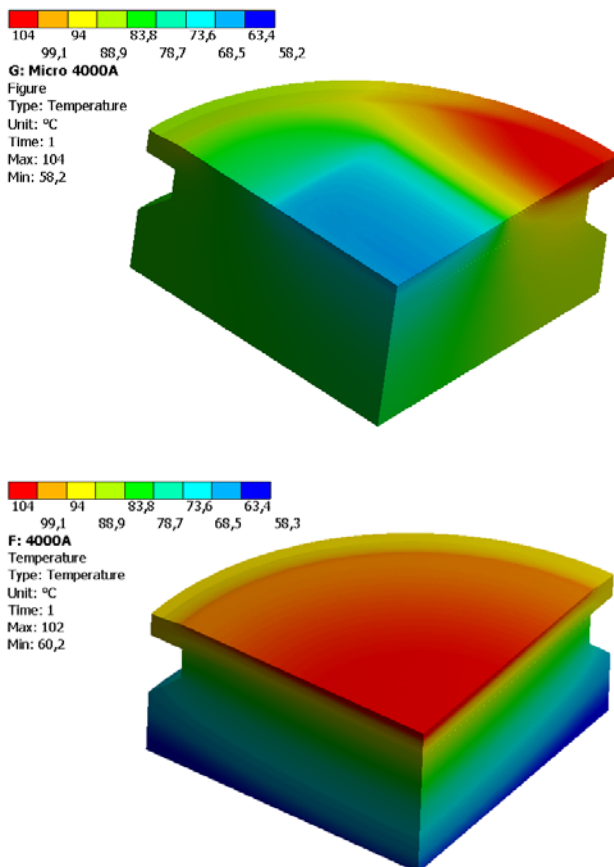
- natężenie prądu na powierzchni elektrody zasilającej od strony anody jest stałe i w kolejnych symulacjach przyjmuje wartości z zakresu 1500 A – 4000 A;
- napięcie na powierzchni elektrody zasilającej od strony katody jest stałe i wynosi 0 V;
- parametry materiałowe przyjmują wartości zgodnie z Tabelą 1;
- chłodzenie w przypadku:
 - a) obudowy zintegrowanej jest zaimplementowane poprzez konwekcyjny warunek brzegowy, gdzie współczynnik przejmowania ciepła przyjmuje wartość 40000 $\text{W/m}^2\text{K}$ i 1000 $\text{W/m}^2\text{K}$ odpowiednio na ściankach mikrokanalów oraz pozostałych powierzchniach toru przepływu cieczy chłodzącej [11];
 - b) chłodzenia konwencjonalnego poprzez konwekcyjny warunek brzegowy przypisany do zewnętrznych powierzchni elektrod zasilających, gdzie współczynnik przejmowania ciepła przyjmuje wartość 23800 $\text{W/m}^2\text{K}$ (odpowiadającą rezystancji cieplnej obudowa-otoczenie 0,01 K/W) [11];
- temperatura odniesienia dla konwekcyjnych warunków brzegowych wynosi 40 $^{\circ}\text{C}$ i opowiada typowym wartościom temperatury cieczy chłodzącej stosowanej w energoelektronice.

Tabela 1. Parametry materiałowe dla potrzeb symulacji numerycznych

	przewodność cieplna [W/mK]	gęstość [kg/m ³]	rezystywność [Ωm]
miedź	386	7850	1,68·10 ⁻⁸
molibden	138	10220	5,52·10 ⁻⁸
krzem	148	2330	zmienna

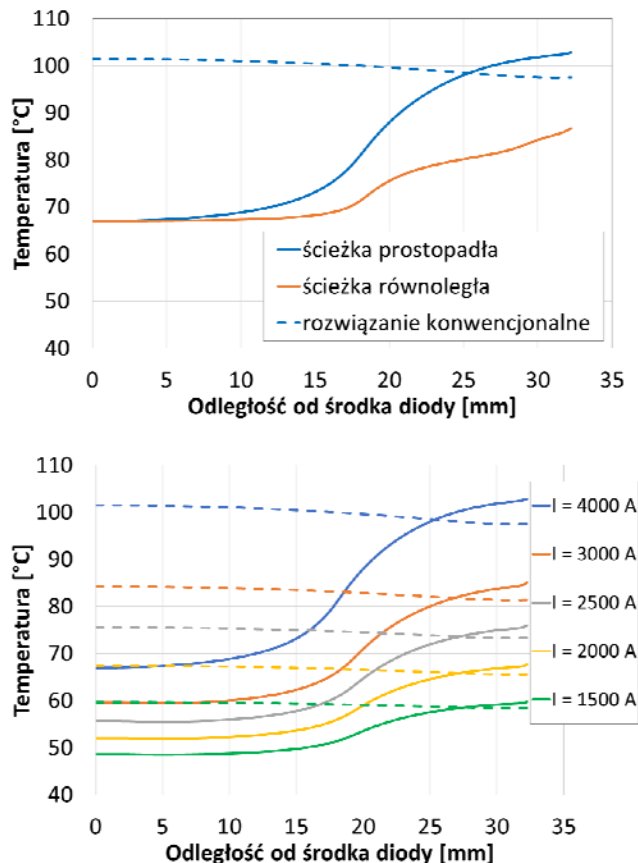
Wyniki

Przykładowe wyniki symulacji numerycznych w postaci rozkładu temperatury w badanej strukturze z uwidocznieniem powierzchni diody od strony katody pokazano na Rys. 4. Wyniki zostały otrzymane dla natężenia prądu 4000 A. Mimo iż, maksymalna temperatura występująca w obszarze krzemu jest o niecałe 2 °C wyższa dla nowej obudowy, to średnia temperatura w strukturze półprzewodnikowej jest o ponad 20 °C niższa w przypadku rozwiązania zintegrowanego.



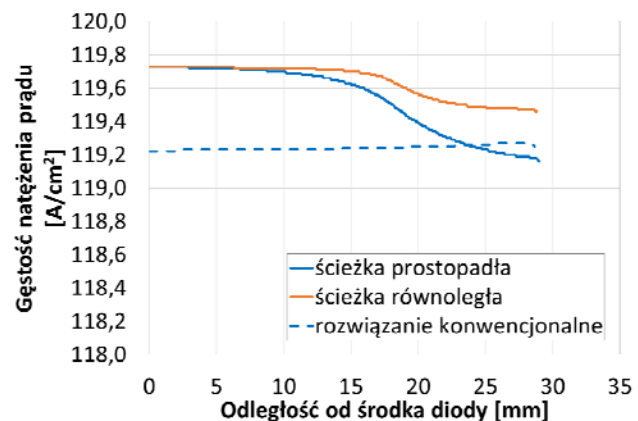
Rys. 4. Rozkład temperatury otrzymany dla 4000 A z uwidocznieniem powierzchni struktury diody od strony katody dla obudowy zintegrowanej (powyżej), rozwiązania konwencjonalnego (poniżej)

W celu lepszego zilustrowania wpływu zastosowanych rozwiązań systemów chłodzenia, na Rys. 5 przedstawiono zmiany temperatury wzdłuż promienia struktury diodowej. Dla rozwiązań z zagnieżdżoną mikrostrukturą wybrano dwie ścieżki zorientowane wzdłuż i prostopadle do sieci kanałów. Nowa obudowa, pomimo wykorzystania jedynie chłodzenia jednostronnego, zapewnia znacząco niższą temperaturę pracy elementu półprzewodnikowego, aczkolwiek charakteryzującą się dużo większą nierównomiernością pola temperaturowego w porównaniu do rozwiązania konwencjonalnego. Różnica temperatury na powierzchni modelowanej struktury krzemowej osiąga wartości 3,4 °C oraz 35,8 °C odpowiednio dla płyt chłodzących i struktury mikrokanalowej dla wartości natężenia prądu 4000 A oraz 1,1 °C i 11,1 °C dla wartości natężenia prądu 1500 A. Ponadto, im wyższa wartość natężenia prądu tym większy obszar przyrządu półprzewodnikowego pracuje z lokalną temperaturą wyższą niż w przypadku rozwiązania konwencjonalnego. W najgorszym przypadku udział powierzchni z wyższą temperaturą nie przekracza 12% całkowitej powierzchni diody.

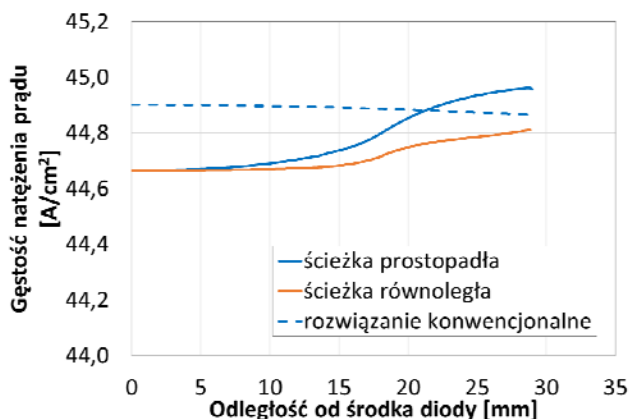


Rys. 5. Rozkład temperatury wzdłuż promienia na powierzchni diody otrzymany dla natężenia prądu 4000 A dla ścieżki prostopadłej i równoległej względem mikrokanalów (powyżej), oraz dla ścieżki prostopadłej przy różnych wartościach natężenia prądu (poniżej); dla porównania linią przerywaną przedstawiono wyniki otrzymane dla rozwiązania konwencjonalnego

Drugim istotnym parametrem z punktu widzenia pracy elementu półprzewodnikowego mocy jest rozkład gęstości natężenia prądu w obszarze struktury półprzewodnikowej. Wpływ na wartości lokalne tej wielkości ma temperatura i jej rozkład oraz obecność w torze prądowym mikrokanalowej struktury chłodzącej. Przykładowe rozkłady gęstości natężenia prądu wzdłuż promienia w kierunku równoległym oraz prostopadłym do sieci mikrokanalów otrzymane dla 4000 A oraz 1500 A przedstawiono na Rys. 6 i Rys. 7. Dla porównania na wykresach zamieszczono również wyniki dla obudów z chłodzeniem konwencjonalnym.



Rys. 6. Rozkład gęstości natężenia prądu wzdłuż promienia na powierzchni diody otrzymany dla 4000 A dla ścieżki prostopadłej i równoległej względem mikrokanalów; dla porównania linią przerywaną przedstawiono wyniki otrzymane dla rozwiązania konwencjonalnego



Rys. 7. Rozkład gęstości natężenia prądu wzdłuż promienia na powierzchni diody otrzymany dla 1500 A dla ścieżki prostopadłej i równoległej względem mikrokanalów; dla porównania linią przerywaną przedstawiono wyniki otrzymane dla rozwiązania konwencjonalnego

Mimo, iż wpływ zarówno temperatury jak i obecności w torze prądowym sieci mikrokanalów i komór wlotowych na rozkład gęstości natężenia prądu jest widoczny, to otrzymane różnice nie przekraczają 1%. W rezultacie, wpływ rozwiązania zintegrowanego na rozkład natężenia prądu jest pomijalny.

Podsumowanie

Podsumowując, w pracy przedstawiono analizy numeryczne, elektrotermiczne nowych obudów zintegrowanych z mikrokanalowymi strukturami chłodzącymi dla półprzewodnikowych elementów mocy. Nowe rozwiązania są w stanie zapewnić zdecydowanie niższe temperatury pracy struktury krzemowej nawet przy wykorzystaniu chłodzenia jednostronnego, choć charakteryzują się większym gradientem temperatury wzdłuż promienia przyrządów pastylkowych. Obecność kanałów i komór zapewniających przepływ cieczy chłodzącej w torze przepływu prądu jest pomijalna z punktu widzenia równomierności rozkładu gęstości natężenia prądu na powierzchni kontaktów elementów elektronicznych.

Autorzy: dr hab. inż. Ewa Raj, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, Wólczańska 211/215, 90-924, Łódź, E-mail: ewa.raj@p.lodz.pl; mgr inż. Salvatore Massa, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, Wólczańska 211/215, 90-924, Łódź, dr inż. Janusz Woźny, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, Wólczańska 211/215, 90-924, Łódź, E-mail: janusz.wozny@p.lodz.pl; prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, Wólczańska 211/215, 90-924, Łódź, E-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Górecki P., Górecki K. Zarębski J., *Badanie właściwości wybranych modeli tranzystorów bipolarnych z izolowaną bramką*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 7, 2017, str. 81-85
- [2] Raj E., *Systemy chłodzenia mikrokanalowego w elektronice*. Zeszyty Naukowe, wolumin 472, nr 1172, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2013
- [2] DB3-3500, karta katalogowa, Kubara LAMINA, kubaralamina.com [dostęp 12.2018]
- [3] Aavid Thermalloy, serwis internetowy, www.aavid.com [dostęp 02.2019]
- [4] Tuckerman D.B., Pease R.F., *High Performance Heat Sinking for VLSI*, IEEE Electron Device Letters, vol. EDL-2, 1981, str.126-129
- [5] Valenzuela J., Jasinski T., Sheikh Z., *Liquid Cooling for High-Power Electronics*, Power Electronics, Feb 2005, str. 50-56
- [6] Oferta firmy Wieland Microcool, www.microcooling.com [dostęp 02.2019]
- [7] Schulz-Harder J., *Efficient Cooling of Power Electronics*, European Conference on Power Electronics Systems and Applications, EPE'09, 2009
- [8] Raj E., Lisik Z., Gozdur R., Fiks W., *New packages for disc type power diodes*, Materials Science and Engineering B, vol. 177, nr 15, 2012, str. 1304-1309
- [9] Vladimirova K., Crebier J.C., Avenas Y., Schaeffer C., *Drift Region Integrated Microchannels for Direct Cooling of Power Electronic Devices: Advantages and Limitations* IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, nr 5, 2013, str.2576-2586
- [10] Lisik Z., Raj E., *Obudowa pastylkowa przyrządu półprzewodnikowego*, patent PL228149B1 udzielony 8.08.2017
- [11] Massa S., *Electro-thermal analysis of power element disc type packages integrated with microchannel cooling systems*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Łódzka: 2019