

Super-efektywne mikrokanalowe cieczowe systemy chłodzenia dla energoelektroniki

Streszczenie. W pracy przedstawiono opracowany w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej system odprowadzania ciepła z wykorzystaniem mikrokanalowych struktur chłodzących charakteryzujących się wysoką efektywnością przekraczającą 600 W/cm². Rozwiązanie to może być z powodzeniem zastosowane do chłodzenia systemów energoelektronicznych, co zostało potwierdzone przykładami takich rozwiązań opracowanych i przebadanych w Katedrze.

Abstract. Paper presents a cooling system based on microchannels developed in the Department of Semiconductor and Optoelectronic Devices at Lodz University of Technology. The solution is characterized by high efficiency exceeding 600 W/cm². It can be successfully used for power electronic system cooling, what has been proved by sample solutions that has been developed and tested. **A cooling system based on microchannels**

Słowa kluczowe: zagadnienia termiczne, chłodzenie mikrokanalowe, systemy chłodzenia o dużej efektywności dla energoelektroniki

Keywords: thermal management, microchannel cooling, high efficiency cooling system for power electronics

Wstęp

Rosnąca skala integracji i miniaturyzacji systemów półprzewodnikowych mocy oraz dążenie do wzrostu elektrycznych parametrów stosowanych w nich struktur półprzewodnikowych powoduje, że moc rozpraszana w pojedynczym elemencie może sięgać tysiąca watów przy gęstościach strumienia ciepła dochodzących do kW/cm². Z tego względu problem utrzymania bezpiecznej temperatury pracy poprzez efektywne odprowadzenie rozpraszanej mocy staje się jednym z podstawowych problemów energoelektroniki, a liczba prac poświęconych opracowaniu wydajnych systemów chłodzenia przyrządów i modułów elektronicznych mocy stale rośnie [1-4]. Poszukuje się zarówno nowych konstrukcji ułatwiających transport ciepła, np. nowych rozwiązań radiatorów, jak i nowych sposobów zintensyfikowania odprowadzania ciepła.

Najprostszym rozwiązaniem mogącym zapewnić bezpieczne warunki pracy elementom elektronicznym jest zastosowanie radiatora powietrznego z konwekcją naturalną lub wymuszoną [4, 5]. Rozwiązaniem bardziej efektywnym jest zastąpienie powietrza cieczą, która ma znacznie większą pojemność cieplną, co pozwala na ponad stukrotnie zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła. Jako ciecz chłodząca stosuje się zarówno wodę jak i specjalne płyny o odpowiednio dobieganych parametrach elektrycznych i termicznych np. Fluorinerty [4, 6]. Podstawowymi elementami cieczowych systemów chłodzenia są elementy stykające się bezpośrednio z chłodzonym przyrządem, przez które przepływa ciecz. Rozwiązanie to wymaga stworzenia zamkniętego układu jej obiegu, co istotnie komplikuje konstrukcję systemu. To utrudnienie oraz obawy przed wprowadzaniem cieczy do układów elektrycznych były głównym powodem ograniczającym praktyczne zastosowania cieczowych systemów chłodzenia. Straciły one jednak obecnie na znaczeniu i obserwuje się wzrost zainteresowania cieczowymi systemami chłodzenia. Obok rozwoju tradycyjnych radiatorów wodnych i płyt chłodzących [4, 5], pojawiły się także rozwiązania wprowadzające płyn chłodzący bezpośrednio do wnętrza przyrządu półprzewodnikowego [7-9].

Jednym z najbardziej obiecujących trendów rozwoju cieczowych systemów chłodzenia jest dążenie do polepszenia ich efektywności na drodze wprowadzenia strumienia cieczy chłodzącej jak najbliżej źródła wydzielania ciepła, czyli pastylki półprzewodnikowej, przy jednoczesnym

zwiększaniu efektywnej powierzchni styku cieczy i elementu chłodzonego. Można to osiągnąć przez poprowadzenie cieczy chłodzącej przez odpowiednią sieć mikrokanalów umieszczonych w mikrostrukturze chłodzącej ulokowanej w bezpośredniej bliskości pastylki półprzewodnikowej lub wręcz z nią zintegrowanej. Przejście od skali "makro", typowej dla dotychczasowych systemów chłodzenia, do skali "mikro", gdy wymiary kanałów są często poniżej 1 mm, stwarza całkiem nowe możliwości ale także i problemy w opisie zjawisk wymiany ciepła w takich strukturach.

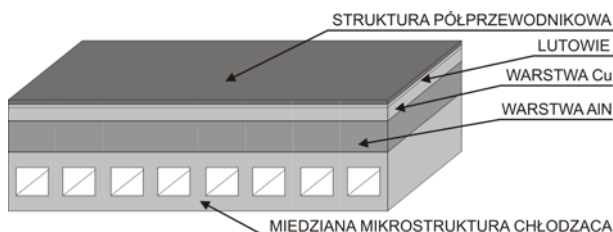
Zagadnienia te znajdują się w obszarze zainteresowań naukowych autorów pracy. Dotyczy to zarówno analizy zjawisk fizycznych związanych z przepływem medium chłodzącego w kanałach o niewielkich średnicach, jak i możliwymi praktycznymi zastosowaniami systemów chłodzenia mikrokanalowego, w szczególności w obszarze energoelektroniki. Cechą charakterystyczną tych zastosowań jest integracja systemu chłodzenia z chłodzonym obiektem, co powoduje, że nie są to rozwiązania ogólnego przeznaczenia ale rozwiązania adresowane dla konkretnego obiektu. Przykłady takich rozwiązań są przedstawione w dalszej części artykułu.

Koncepcja mikrokanalów w elektronice

Pierwsza propozycja wykorzystania mikrokanalowych systemów chłodzenia w elektronice jest związana z pracą Tuckermana i Pease'a [10] opublikowaną w roku 1981. Przedstawili oni analizę zastosowania niewielkich kanałów o przekroju prostokątnym wykonanych w spodniej warstwie podłoża układu scalonego do chłodzenia tychże układów. Wykazali oni możliwość odprowadzenia nawet do 790 W z powierzchni 1 cm², co jednak wymagało zastosowania wysokich ciśnień wlotowych sięgających 214 kPa. Są to wartości nierealistyczne z punktu widzenia możliwości konstrukcyjnych układów VLSI, jednakże praca ta pokazała duże potencjalne możliwości tkwiące w rozwiązaniach mikrokanalowych i zapoczątkowała trwające do dziś prace nad tego typu systemami.

Prace dotyczące wprowadzenia systemów chłodzenia mikrokanalowego w energoelektronice są także prowadzone od kilkunastu lat w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej [3, 8, 11-13]. Ich punktem wyjścia była modelowa struktura takiego systemu przedstawiona na Rys. 1 [11]. Odpowiada ona elektroizolowanemu modułowi zawierającemu strukturę półprzewodnikową oraz zintegrowaną z nią strukturę mikrokanalową.

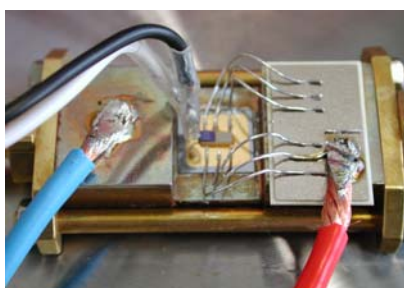
Przeprowadzone analizy numeryczne, biorące pod uwagę warunki przepływu wody jako medium chłodzącego, warunki wymiany ciepła na granicy medium chłodzącego kanału oraz dyfuzyjny i masowy transport ciepła w modelowanej strukturze, pozwoliły na określenie optymalnych parametrów konstrukcyjnych takiej struktury, a następnie na wykonanie i przebadanie jej demonstratora zaprojektowanego jako element chłodzący tranzystor IGBT w Inteligentnym Module Mocy [12]. Widok zewnętrzny samej mikrokanalowej struktury chłodzącej jest pokazany na Rys. 2, natomiast na Rys. 3 pokazano tę strukturę połączoną ze strukturą półprzewodnikową, przygotowaną do badań jej efektywności jako radiatora tranzystora IGBT.



Rys. 1. Analizowany system chłodzenia mikrokanalowego odpowiadający konstrukcji elektroizolowanego modułu mocy



Rys. 2. Widok zewnętrzny demonstratora systemu mikrokanalowego oraz przekrój struktury mikrokanalowej

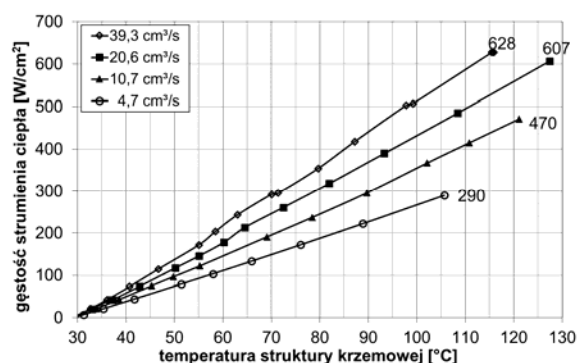


Rys. 3. Demonstrator jako element chłodzący tranzystor IGBT

Wynikiem tych badań są charakterystyki przedstawione na Rys. 4. Pokazują one efektywność odbioru ciepła przez system mikrokanalowy dla różnych wartości maksymalnej temperatury struktury półprzewodnikowej, która zmienia się od temperatury otoczenia 30 °C do temperatury maksymalnej dla tranzystora IGBT, którą przyjęto jako równą 125 °C. Potwierdzają one wysoką efektywność odbioru ciepła przez opracowany system mikrokanalowy, która może przekraczać 600 W/cm² przy utrzymaniu temperatury struktury półprzewodnikowej na bezpiecznym poziomie.

Przedstawione rozwiązanie chłodzenia mikrokanalowego znakomicie nadaje się do zastosowań w energoelektronice pod warunkiem, że istnieje możliwość ulokowania struktury mikrokanalowej w bezpośrednim sąsiedztwie chłodzonego obszaru. Najłatwiej uzyskać to poprzez jej integrację z chłodzonym systemem, czyli poprzez stosowanie dedykowanych wbudowanych systemów chłodzenia mikrokanalowego projektowanych

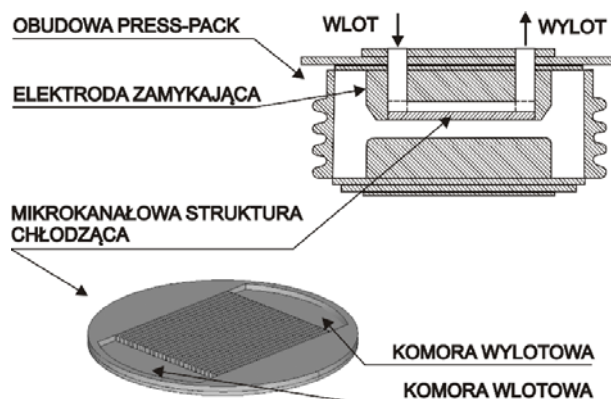
z uwzględnieniem specyfiki chłodzonego systemu. Kilka takich dedykowanych rozwiązań opracowanych w Katedrze jest przedstawionych w kolejnych rozdziałach.



Rys. 4. Gęstość odbieranego strumienia ciepła od chłodzonej struktury IGBT w zależności od temperatury tej struktury dla różnych prędkości przepływu wody

Obudowa pastylkowa z wbudowanym mikrokanalowym systemem chłodzenia cieczowego

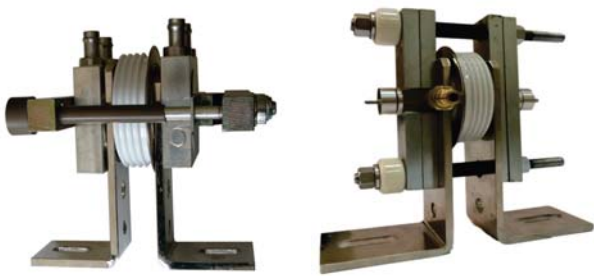
Spektakularnym przykładem sytuacji, gdy efektywność systemu chłodzenia wpływa na deklarowane parametry eksploatacyjne przyrządu mocy są diody zamykane w obudowach pastylkowych typu „press-pack”. Dla tej samej struktury diodowej mogą się one zmieniać w zależności od rezystancji termicznej zastosowanych przez producenta obudowy i radiatora. Stąd konkluzja, że można uzyskać lepsze parametry eksploatacyjne integrując super efektywny mikrokanalowy system chłodzenia bezpośrednio z obudową pastylkową, jak to jest pokazane na Rys. 5 [4, 8].



Rys. 5. Schemat obudowy pastylkowej według [14] zintegrowanej z mikrokanalową strukturą chłodzącą

Rozwiązanie takie [14], zostało opracowane i przebadane w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych. Na Rys. 6 [4, 8] przedstawiono dwie, porównywane w badaniach diody mocy DB3-3500 produkcji firmy LAMINA (obecnie KUBARA-LAMINA) zamknięte odpowiednio w obudowie standardowej DO-200AE z dodatkowymi radiatorami wodnymi oraz w obudowie zmodyfikowanej zintegrowanej z mikrostrukturą chłodzącą.

Efektom wprowadzonej modyfikacji, obok zmniejszenia wymiarów i usunięcia dodatkowych radiatorów wodnych, uzyskano także zmniejszenie rezystancji cieplnej struktura półprzewodnikowa-woda chłodząca. Zmianę tą ilustruje Rys. 7 [4, 8], na którym porównano rezystancję cieplną rozwiązania standardowego z dwustronnym chłodzeniem oraz rezystancję cieplną gdy w zmodyfikowanej obudowie wprowadzono jednostronnie mikrokanalową strukturę chłodzącą (jak na Rys. 5).



Rys.6. Dioda mocy zamknięta w obudowie z dwustronnym chłodzeniem cieczowym (po lewej), w obudowie zintegrowanej z mikrostrukturą chłodzącą (po prawej)



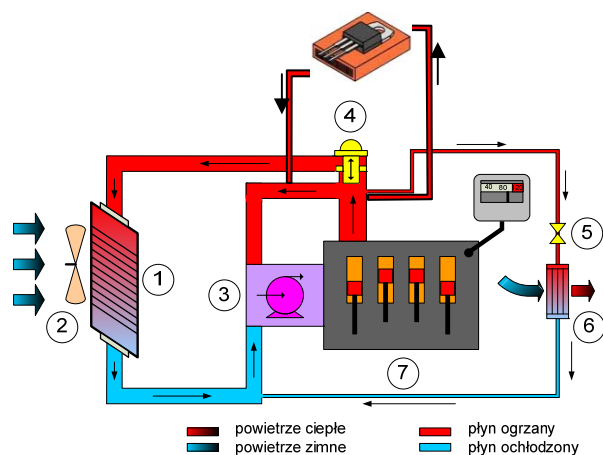
Rys.7. Rezystancja cieplna w funkcji prędkości przepływu cieczy chłodzącej

Mikrokanalowe systemy chłodzenia cieczowego dla zastosowań w elektronice samochodowej

Podstawową trudnością związaną z wprowadzaniem systemów elektronicznych do pojazdów są problemy termiczne wynikające z bardzo różnych warunków pracy charakteryzujących się lokalnymi temperaturami otoczenia o znacznych wartościach i dużych gradientach. Przykładem jest tu np. temperatura w komorze silnika, która może sięgać 200 °C. Dodatkowo, ograniczenia w dostępnej przestrzeni wymuszają integrację podzespołów elektronicznych oraz ograniczają możliwości stosowania bardziej efektywnych metod chłodzenia.

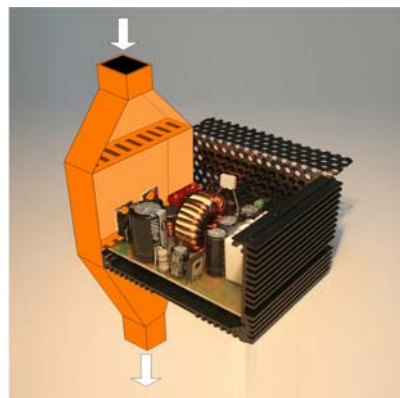
Przemysł samochodowy szuka rozwiązań, które pomogą zminimalizować te ograniczenia. Z jednej strony inwestuje w elektronikę wysokotemperaturową, w której krzem jest zastępowany przez półprzewodniki szerokopasmowe (SiC i GaN), z drugiej strony poszukuje nowych rozwiązań chłodzenia, najlepiej wykorzystujących istniejący w pojazdach cieczowy system chłodzenia silnika, jak to schematycznie prezentuje Rys. 8. W tym przypadku, biorąc pod uwagę wysoką temperaturę cieczy chłodzącej, która może sięgać 90 °C, aby utrzymać bezpieczną temperaturę chłodzonych komponentów elektronicznych, potrzebne jest rozwiązanie odbiornika ciepła o bardzo dużej efektywności. Warunek ten spełniają dedykowane systemy chłodzenia mikrokanalowego i taki system został schematycznie wprowadzony na rysunku 8 [13].

W Katedrze zaprojektowano wykonano i przebadano mikrokanalowy system dedykowany do chłodzenia typowego konwertera DC/DC PE-48 przewidzianego do pracy w pojazdach samochodowych. Przyjęta koncepcja integracji systemu chłodzącego z konwerterem, zakładająca odprowadzanie ciepła z kluczy półprzewodnikowych, jest pokazana na Rys. 9a, a widok wykonanej i dedykowanej mikrokanalowej struktury chłodzącej pokazuje Rys. 9b.



Rys.8. Układ chłodzenia silnika pojazdu z dołączoną pętlą zawierającą strukturę mikro-kanalową: 1)chłodnica; 2)wentylator chłodniczy; 3) pompa; 4) termostat; 5) zawór regulacji ogrzewania; 6)wymiennik ciepła; 7) silnik

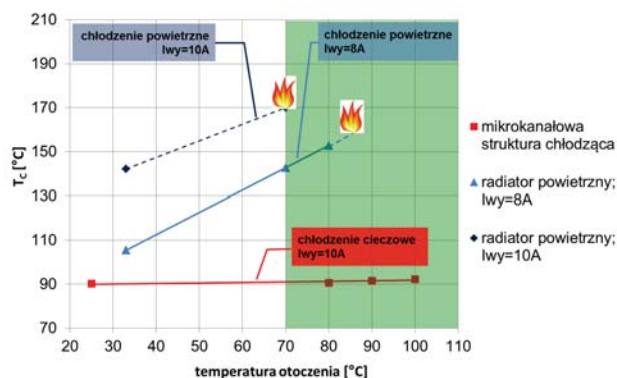
(a)



(b)



Rys.9. Koncepcja integracji mikrokanalowej struktury chłodzącej z konwerterem (a) oraz widok wykonanej struktury chłodzącej (b)



Rys.10. Temperatura obudowy tranzystora mocy (T_c) z układu konwertera w funkcji temperatury otoczenia dla różnych rozwiązań układów chłodzenia

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki badań wpływu temperatury otoczenia na zmiany temperatury obudowy

tranzystorów T_C przy standardowym chłodzeniu z użyciem radiatorów powietrznych oraz po wprowadzeniu do konwertera mikrokanalowej struktury chłodzącej, przez którą płynie ciecz o temperaturze $90\text{ }^\circ\text{C}$. Obszar zaznaczony na zielono odpowiada typowym temperaturom panującym w przedziale silnikowym samochodu. Jak można zauważyć, chłodzenie z zastosowaniem radiatorów powietrznych prowadzi do przekroczenia bezpiecznej temperatury kluczy tranzystorowych po wejściu w „obszar zielony”, natomiast przy chłodzeniu mikrokanalowym zmiany temperatury otoczenia praktycznie nie wpływają na warunki pracy tranzystorów.

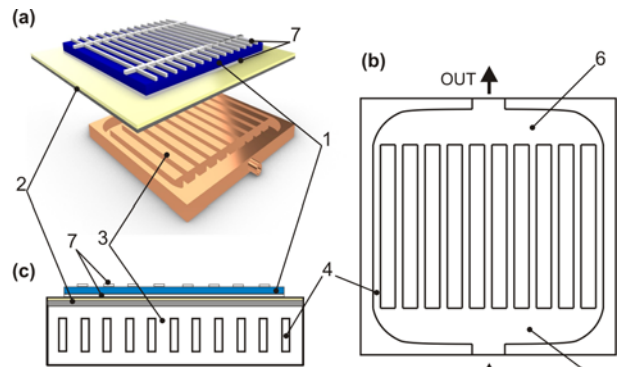
Mikrokanalowe systemy chłodzenia cieczowego struktur fotowoltaicznych

Z zasady swojego działania, panele fotowoltaiczne są wystawione na ekspozycję promieniowania słonecznego, co z jednej strony umożliwia konwersję ok. 20% energii słonecznej na energię elektryczną, ale z drugiej strony powoduje ich intensywne nagrzewanie w wyniku konwersji pozostałej części energii słonecznej na ciepło zwiększając temperaturę panelu, która może sięgać $80\text{ }^\circ\text{C}$. Jest to efekt niekorzystny, gdyż efektywność konwersji fotowoltaicznej maleje ze wzrostem temperatury elementu fotowoltaicznego o $0,4\pm 0,9\%$ na każdy stopień powyżej temperatury znamionowej przyjmowanej jako $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Rozwiązaniem zwiększającym całkowitą efektywność przekształcania energii słonecznej w energię użyteczną jest hybrydowy panel solarny PV/T będący połączeniem panelu fotowoltaicznego dostarczającego energię elektryczną i cieczowego kolektora energii słonecznej, dostarczającego podgrzaną wodę. Jego całkowita efektywność przetwarzania energii promieniowania słonecznego w energię użyteczną może sięgać nawet $50\pm 60\%$, a stabilizacyjna rola części cieczowej panelu dla temperatury elementów fotowoltaicznych, która może być utrzymana na niższym poziomie, skutkuje wzrostem efektywności konwersji fotowoltaicznej nawet o 30% dla tych samych warunków eksploatacyjnych.

Dla efektywności całego systemu PV/T istotne znaczenie ma utrzymanie temperatury elementów fotowoltaicznych na jak najniższym poziomie. Efekt ten można uzyskać zmniejszając do minimum różnicę temperatur pomiędzy temperaturą tych elementów a cieczą, czyli zwiększając efektywność odbioru ciepła przez ciecz. Nie da się tego osiągnąć stosując typowe rozwiązania kolektorów solarnych. Potrzebne jest tu nowe rozwiązanie, np. wykorzystujące jako cieczowe konwertery super efektywne struktury mikrokanalowe. Prace w tym obszarze są prowadzone w Katedrze, a ich efektem jest koncepcja elementarnych hybrydowych modułów solarnych chroniona zgłoszeniem patentowym nr PL429419 [15].

Koncepcja ta została zilustrowana na Rys. 11 przedstawiającym ogólny widok złożeniowy 3D modułu (Rys. 11a), widok z góry jego struktury mikrokanalowej (Rys. 11b) oraz przekrój poprzeczny modułu (Rys. 11c). Zaznaczono na nim następujące elementy składowe: fotowoltaiczną strukturę półprzewodnikową (1) wraz z kontaktami górnym i dolnym (7) zamontowaną na płaskiej płycie o właściwościach izolacyjnych, mikrokanalowy moduł chłodzący (3), który zawiera szereg równoległych względem siebie mikro-kanalów (4), których końce z jednej strony są złączone z komorą wlotową (5) połączoną z otworem wlotowym IN płynu chłodzącego, a z drugiej strony są złączone z komorą wylotową (6) połączoną z otworem wylotowym OUT płynu chłodzącego.



Rys.11. Koncepcja elementarnego hybrydowego modułu solarnego: (a) widok złożeniowy 3D; (b) widok z góry mikrokanalowej struktury chłodzącej; (c) przekrój poprzeczny strukturę

Rozwiązanie to jest obecnie przedmiotem badań prowadzonych w ramach projektu NCBiR POIR.04.01.04-00-0019/19 „Systemy hybrydowe do konwersji energii słonecznej” (2019-2022) i będzie podstawą do opracowania i wprowadzenia na rynek nowej generacji zintegrowanych paneli hybrydowych PV/T zawierających sieć elementarnych hybrydowych modułów solarnych.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono opracowany w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych efektywny system odbioru ciepła z wykorzystaniem mikrokanalowych struktur chłodzących charakteryzujących się wysoką efektywnością przekraczającą 600 W/cm^2 . Rozwiązanie to może być z powodzeniem zastosowane do chłodzenia systemów energoelektronicznych, co zostało potwierdzone szeregiem przykładów opracowanych i przebadanych w Katedrze.

Tak wysoka efektywność odbioru ciepła nie jest powszechnie wymagana. Potrzeba taka występuje przy dużych lokalnych gęstościach wydzielania ciepła, gdy zastosowanie tańszych rozwiązań klasycznych może prowadzić do przekroczenia dopuszczalnej temperatury grzejącego się elementu (np. przyrządu półprzewodnikowego) oraz w przypadkach, gdy różnica temperatur pomiędzy elementem, w którym wydzielane jest ciepło a otoczeniem jest (musi być) mała, jak to ma miejsce np. w rozwiązaniach elektroniki samochodowej czy w przypadku odbioru ciepła od elementów fotowoltaicznych.

Wymóg lokowania struktury chłodzącej jak najbliższe miejsca wydzielania ciepła powoduje, że aby móc efektywnie wykorzystać jego unikatową efektywność przejmowania ciepła, należy systemy te traktować jako systemy dedykowane, projektowane i wykonane tak aby można je było zintegrować z obiektem chłodzonym. Aby ten warunek spełnić, trzeba je projektować indywidualnie dla każdego systemu elektronicznego. Nie jest to możliwe w warunkach instytucji badawczej jaką jest Politechnika. Dlatego stworzono przy Katedrze pracowniczą spółkę typu spin-off, SemiMod, która może takie usługi świadczyć w oparciu o doświadczenie i zaplecze Katedry.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Lisik, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: zbigniew.lisik@p.lodz.pl; dr hab. inż. Ewa Raj, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: ewa.raj@p.lodz.pl; dr inż. Tomasz Widerski, Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź, E-mail: tomasz.widerski@p.lodz.pl.

LITERATURA

- [1] Agostini B. et al., State of the art of high heat flux cooling technologies, *Heat Transfer Engineering*, vol. 28, nr 4, 2007, 258-281
- [2] Kang S.S., Advanced Cooling for Power Electronics, *Electronics Cooling*, Jul 2017, electronics-cooling.com, dostęp 08.2019
- [3] Valenzuela J., Jasinski T., Sheikh Z., Liquid Cooling for High-Power Electronics, *Power Electronics*, Feb 2005, 50-56
- [4] Raj E., Systemy chłodzenia mikrokanalowego w elektronice. *Zeszyty Naukowe*, wolumin 472, nr 1172, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 2013
- [5] Oferta firmy DAU, dau-heatsinks.com [dostęp 08.2019]
- [6] Fluorinert Electronic Liquids, oferta firmy 3M, 3m.com [dostęp 08.2019]
- [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, 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, 2576-2586
- [10] Tuckerman D.B., Pease R.F., High Performance Heat Sinking for VLSI, *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-2, 1981, 126-129
- [11] Raj E., Lisik Z., Langer M., Analiza efektywności chłodzenia układów elektronicznych z wykorzystaniem mikrostruktur chłodzących, Krajowa Konferencja Elektroniki, Kołobrzeg - Dźwirzyno, tom 2/2; 2002, 825-830
- [12] Raj E., Lisik Z., Rudzki J., Langer M., Widerski T., Cooling microstructure for power devices, XVIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits EPNC 2004, Poznań, 2004, 85-86
- [13] Widerski T., Mikrokanalowy system chłodzenia cieczowego dla podzespołów elektronicznych i elektrotechnicznych w pojazdach, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź: 2012
- [14] Lisik Z., Raj E., Obudowa pastylkowa przyrządu półprzewodnikowego, patent PL228149B1 udzielony 8.08.2017
- [15] Lisik Z., Znajdek K., Raj E., Elementarny hybrydowy moduł solarny oraz hybrydowy cieczowy panel solarny, zgłoszenie patentowe nr PL429419 dn. 29.03.2019.