

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, ELEKTRONIKI,
INFORMATYKI I AUTOMATYKI
POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ**

Tytuł rozprawy: Modelling of multicore processors for the investigation of temperature reduction methods

(Modelowanie procesorów wielordzeniowych w celu badania metod obniżania maksymalnej temperatury)

Autor rozprawy: mgr inż. Melvin Estuardo GALICIA COTA

- 1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Przedmiotem rozprawy są zagadnienia rozprowadzania ciepła w zaawansowanych wielordzeniowych procesorach realizowanych w głęboko submikrometrowych technologiach, w tym w strukturach trójwymiarowych z dwiema aktywnymi warstwami krzemowymi. Praca ma charakter teoretyczny, podstawą analiz są symulacje pracy procesorów dla różnych wariantów konstrukcyjnych, na przykładzie technologii o wymiarach charakterystycznych 32 nm i poniżej. Autor czytelnie sformułował dwie tezy rozprawy dotyczące skutków zastosowania przelotek termicznych w buforach zlokalizowanych obok rdzeni procesora w celu redukcji maksymalnej temperatury w strukturze z korzyścią dla jego wydajności.

- 2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Bibliografia rozprawy liczy 125 pozycji i świadczy o znajomości literatury na temat modelowania przepływu ciepła w strukturach systemów scalonych i sposobów redukcji problemów termicznych w wysoko wydajnych procesorach. Przegląd tej literatury stanowi większą część rozprawy. Obejmuje zagadnienia transportu ciepła oraz przedstawia koncepcje wykorzystanego przez Autora zbioru ogólnodostępnych symulatorów Gem5, McPat, ANSYS i HotSpot, pozwalającego dla określonych wzorców określać aktywność (statystykę pracy

jednostek CPU) procesora o określonej architekturze, następnie pobór mocy (wydajność źródeł ciepła) i rozkład temperatury w strukturze.

Autor cytuje 5 własnych publikacji związanych z tematem rozprawy. Wprawdzie jest w nich jednym z kilku współautorów, to o jego głównym udziale świadczy to, że występuje na pierwszej lub drugiej pozycji. Należy podkreślić, że są to materiały z konferencji o zasięgu międzynarodowym oraz artykuł w czasopiśmie *Microelectronics Journal*.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Autor prawidłowo zaplanował eksperymenty obliczeniowe i umiejętnie posłużył się wspomnianymi w poprzednim punkcie symulatorami dla przeprowadzenia analiz wpływu rozmieszczenia obszarów zawierających przelotki termiczne oraz parametrów tych obszarów: wielkości i efektywnej przewodności (określonej gęstością przelotek) na rozkład temperatury w wybranym, krytycznym przekroju warstwy zawierającej rdzenie procesora. Zbadał także dla ustalonej konfiguracji drogi chłodzenia, wpływ grubości aktywnej warstwy krzemowej oraz grubości i przewodności przekładki izolacyjnej.

Nie opracował wprawdzie własnych narzędzi do analizy bądź wspomaganie projektowania, lecz porównał dwie metody symulacji termicznej – na podstawie dokładniejszych numerycznych rozwiązań równań opisujących transport ciepła zweryfikował dokładność analizy termicznej przy zastosowaniu modelu kompaktowego opartego na analogii przepływu ciepła i prądu elektrycznego. Wprowadził usprawnienie do tego modelu skracające czas wykonania analizy czasowej, lecz nie wskazał celowości obliczania czasu narastania temperatury i nie wykorzystał tej procedury.

Autor traktuje rozwiązania numeryczne (ANSYS) jako dokładne i zwraca uwagę na znaczenie prawidłowej generacji siatki dyskretyzacyjnej, ale nie przedstawił weryfikacji jej gęstości z punktu widzenia dokładności obliczeń. Inne wyniki pracy też nie zostały zweryfikowane.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Podstawowym, niosącym znamiona oryginalności wkładem Autora do redukcji termicznych ograniczeń wydajności procesorów jest przeprowadzenie wymienionych już analiz symulacyjnych i sformułowanie wniosków dotyczących różnych sposobów rozmieszczenia obszarów rozpraszania ciepła przez przelotki i doboru ich parametrów, w strukturach trójwymiarowych. Wykazano, że umieszczając te obszary między rdzeniami procesora i odpowiednio orientując rdzenie w warstwie krzemowej można zredukować maksymalną temperaturę o kilka stopni, co dowodzi kierunkowo tezy nr 1, chociaż nie zostało w pracy wyjaśnione, dlaczego zmianę tę można uznać za znaczącą.

Analizy zostały wykonane na przykładzie nowoczesnych procesorów firmy Intel wykonanych w technologiach o wymiarze charakterystycznym głęboko submikrometrowym, co świadczy o aktualności rozważanego problemu.

Dodatковым wkładem jest ocena stosowanych symulatorów, w szczególności weryfikacja dokładności symulacji termicznych wykorzystujących model kompaktowy.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Koncepcję eksperymentów symulacyjnych i wykorzystane metody przedstawiono w sposób klarowny, a wnioskowanie jest przekonujące. Nazbyt rozbudowana jest jednak część przytaczająca znane z literatury opisy modeli i metod redukcji temperatury w stosunku do części stanowiącej własny wkład Autora.

Praca napisana jest po angielsku. Recenzent nie czuje się powołany do oceny strony językowej, nie sposób jednak nie zauważyć bardzo licznych błędów literowych i gramatycznych, w tym w budowaniu strony biernej czasowników.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Do wad rozprawy należą zasygnalizowane wcześniej usterki redakcyjne i edytorskie oraz brak weryfikacji wyników, nawet informacji weryfikacji gęstości siatki dyskretyzacyjnej z punktu widzenia dokładności obliczeń. Należy też zauważyć, że elementarne wzory opisujące transport ciepła zamieszczone w rozdz. 2 są wprawdzie podstawą takich symulatorów jak ANSYS, jednak w pracy niczemu nie służą – nie są przez Autora wykorzystywane. Nawet w dalszej części pracy równanie transportu ciepła (3.3) przytoczono bez związku z treścią tego rozdziału, zwłaszcza wzorem (2.2). Ponadto Autor nazywa ten wzór równaniem dyfuzji ciepła, podczas gdy ta nazwa przynależy prawu Fouriera (2.1). Związek (2.2) otrzymuje się po podstawieniu wzoru określającego strumień ciepła (2.1) do podstawowego równania Fouriera transportu ciepła.

Przede wszystkim jednak zastrzeżenia budzi brak ustosunkowania się Autora do dwóch zasadniczych problemów.

- Przeprowadzone symulacje wskazują na możliwość obniżenia maksymalnej wartości temperatury w układzie po zastosowaniu rozważanych zabiegów, lecz nie skomentowano tego wyniku w kontekście doniesień literaturowych. Autor poprzestał na stwierdzeniu, że umieszczenie zgrupowanych kanałów przewodzących ciepło poza rdzeniami procesorów pozwala uniknąć problemów projektowych związanych z wprowadzeniem przelotek do wnętrza układów. Pogłębiona analiza porównawcza tych rozwiązań wydaje się być potrzebna, bowiem optymalizacja rozmieszczenia przelotek na całej powierzchni układu scalonego może pozwolić zredukować wzrost temperatury nawet dwukrotnie. Co więcej, istnieją algorytmy wspomagające rozmieszczanie tych kanałów przewodzących ciepło.
- Wprowadzenie buforów z kanałami termicznymi między rdzeniami powoduje zwiększenie powierzchni zajmowanej przez układ i wydłużenie połączeń wewnątrz procesora, co jest źródłem dodatkowych opóźnień sygnału. W pracy pominięto analizę tego efektu, co uniemożliwia pełną ocenę znaczenia zastosowanego sposobu zwiększenia wydajności układu.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa zawiera szereg wyników ilościowych badań dotyczących różnych sposobów rozmieszczenia obszarów rozprzodzenia ciepła przez kanały termiczne i doboru ich parametrów. Wyniki te i wnioski mogą być przydatne projektantom układów zintegrowanych trójwymiarowo poszukujących przezwyciężenia bariery termicznej w zwiększaniu skali integracji oraz wydajności układów. Brak wspomnianej analizy opóźnień sygnału ogranicza jednak praktyczną przydatność rozprawy.

8. **Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**
- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
 - b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
 - c/ spełniająca wymagania
 - d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
 - e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

W opinii recenzenta rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. **Wnoszę o dopuszczenie mgra inż. Melvina Estuarda Galicia Coty do publicznej obrony rozprawy.**

