

INNOWACJE TECHNOLOGICZNE MOTOREM NAPĘDOWYM WZROSTU WYDAJNOŚCI NAJNOWSZYCH PROCESORÓW

Marcin LORENC, Krzysztof CEGIELSKI, Aleksandra CEGIELSKA

Streszczenie: Celem artykułu jest zaprezentowanie innowacyjnych rozwiązań podnoszących wydajność super komputerów. Przedstawiono mikroarchitekturę Intel MIC, oraz technologię Intel 3D Tri-Gate. Omówiono nową serię wydajnych koprocessorów oraz zaprezentowano kierunki rozwoju mikroarchitektur procesorowych.

Słowa kluczowe: koprocessor, Intel, MIC, tri-gate, tranzystor

1. Wprowadzenie

Od ponad ćwierć wieku badania naukowe napędzane były przez wymagania dużych ilości mocy obliczeniowej „zaszytych” w osobistych stacjach roboczych jak również w klastrach serwerów zwanych superkomputerami. Dzięki tym maszynom rozwikłano tajemnicę ludzkiego genomu. Inżynierowie na całym świecie zaczęli używać komputerów, jako narzędzia do cyfrowego projektowania. Pozwoliło to na znaczne obniżenie kosztów, jak również skróciło czas do wprowadzenia finalnego produktu praktycznie w każdej branży. Patrząc w przyszłość, uporządkowany schemat dane – informacja – wiedza, staje się podstawowym narzędziem dla cyfrowo aktywnych gospodarek na całym świecie. Coraz nowsze i bardziej wymagające aplikacje wymagają dużych mocy obliczeniowych co sprawia, że to czym człowiek dysponował w przeszłości stanowi obecnie wierzchołek góry lodowej obecnych potrzeb.

Dziś producenci sprzętu komputerowego robią wszystko by zwiększyć tempo odkryć i innowacji. Jedną z firm, będących obecnie liderem światowego rynku produkującą sprzęt dedykowany do wykonywania skomplikowanych operacji obliczeniowych jest firma Intel.

2. Układy Intel Xeon

W grudniu 2012 roku firma Intel zaprezentowała koprocessor Intel Xeon Phi [1,2,3], który jest rozszerzeniem grupy produktów Intel Xeon. Wykorzystuje on architekturę Intel MIC (ang. Many Integrated Core) [4] oraz wykonany jest w technologii 22nm z użyciem tranzystorów 3D Tri-Gate. Karta, na której umieszczono procesor komunikuje się za pomocą interfejsu PCI-Express 2.0.

2.1. Mikroarchitektura Intel MIC

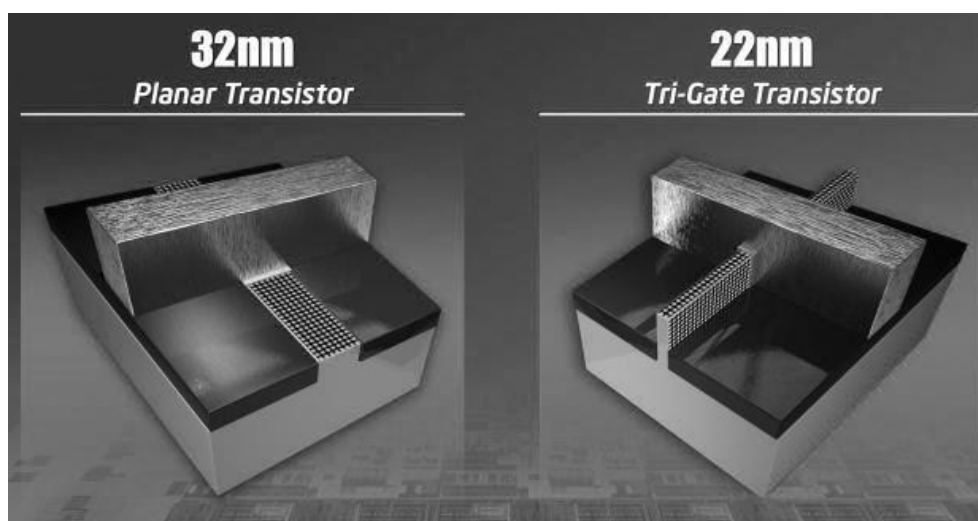
Mikroarchitektura MIC (ang. Intel Many Integrated Core) stanowi najnowszy przełom w dziedzinie szybkości, wydajności i kompatybilności super wydajnych systemów obliczeniowych, oferując w ramach pojedynczego układu moc obliczeniową mierzoną w operacjach zmiennoprzecinkowych nawet do jednego TeraFLOPa¹. Zaprezentowana

¹ FLOP (ang. Floating Point Operation per Second) – Jednostka mocy obliczeniowej komputerów. Jest to stosunek ilości wykonanych operacji w jednostce czasu – sekundzie.

została podczas konferencji International Supercomputing Conference w 2011 roku, która odbyła się w Seattle w Stanach Zjednoczonych. Podstawową architekturą jest wykorzystanie procesorów x86 by stworzyć wieloprocesorową architekturę kompatybilną z modelem programowym x86. Rdzenie Intel MIC bazują na zmodyfikowanej konstrukcji P54C, stosowanej pierwotnie w procesorach Pentium i są połączone na jednym chipie. Podstawową zaletą jest łatwość tworzenia aplikacji. Deweloperzy mogą korzystać ze standardowych języków programowania takich jak C, C++ oraz FORTRAN. Kod źródłowy napisany dla produktów Intel MIC może być kompilowany na standardowym procesorze Intel Xeon.

2.2. Tranzystor Tri-Gate

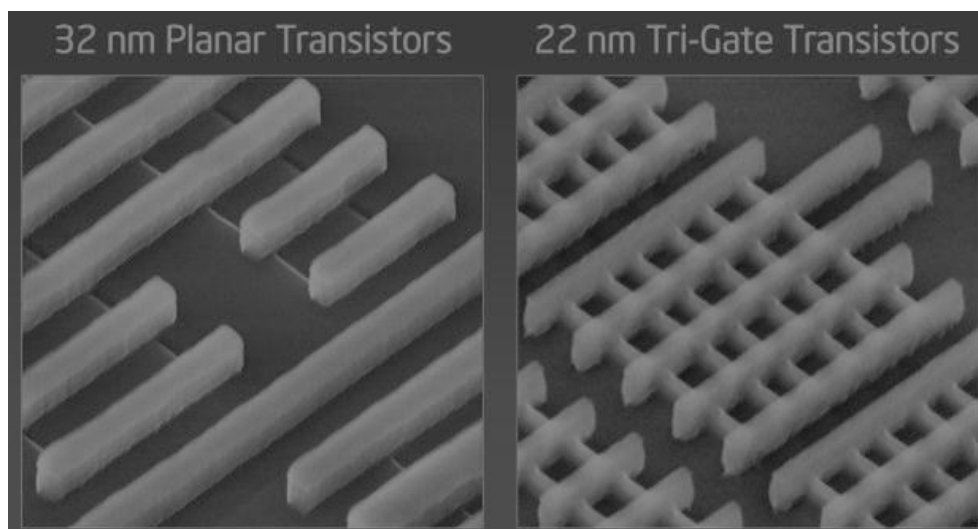
Tranzystor jest podstawowym elementem elektronicznym, z których zbudowane są procesory. Jak dotąd wzrost wydajności i mniejszy pobór prądu otrzymywano przez wprowadzanie technologii umożliwiających produkcję układów cyfrowych w coraz niższym procesie technologicznym. Tranzystory nazwano trój-bramkowe ze względu na zastosowanie bramki kontrolującej przepływ elektronów z trzech stron. Pierwszy raz zostały zastosowane przez firmę Intel w procesorach z rodziny Ivy Bridge wykonane w technologii 22nm.



Rys. 1. Tranzystor planarny (2D) i Tri-gate (3D) [9]

Rys. 1. przedstawia płaski tranzystor, gdzie krzemowy kanał jest w płaszczyźnie procesora i "Tri-Gate" tranzystor, znany również jako tranzystor 3D lub finfet² ponieważ kanał wystaje niczym pletwa [4,9,10]. Dzięki innowacyjnemu rozwiązaniu firmy Intel, oraz przejściu z procesu technologicznego 32 nm na 22 nm, w którym wyprodukowano procesory Ivy Bridge oraz Xeon Phi, osiągnięto zwiększoną wydajność względem układów wykorzystujących technologię 32 nm oraz tranzystory planarne.

² FET (ang. Field Effect Transistor) – tranzystor polowy, w którym sterowanie prądem odbywa się za pomocą pola elektrycznego



Rys. 2. Porównanie mikroarchitektury 32nm i 22 nm [9]

Mikroarchitektura nowego tranzystora dzięki zastosowaniu nowego elementu tranzystora zapewnia lepszą kontrolę przepływu elektronów, a w rezultacie wyższą wydajność i mniejsze straty mocy. Dodatkową korzyścią jest możliwość umieszczania tranzystorów bliżej siebie niż w przypadku układów planarnych (Rys. 3)[4,9,10]. Pozwala to zmniejszyć rozmiar procesora. Dzięki możliwości zapewnienia takiej samej wydajności co układy produkowane w technologii 32 nm przy jednoczesnym spadku o 50% zapotrzebowaniu na energię, układy firmy Intel mogą być wykorzystywane w urządzeniach mobilnych. Przy takim zastosowaniu kluczową cechą jest duża energooszczędność i uzyskanie wysokiej wydajności.

2.3. Koprocesor Intel Xeon Phi

Mimo zgodności z oprogramowaniem dla architektury x86, koprocesory Intel Xeon Phi wyróżniają się bardzo dużą wydajnością. W przypadku obliczeń zmiennoprzecinkowych podwójnej precyzji, wynosi ona około 1 TeraFLOPa (dla pojedynczego układu) [1,2,3]. To znacznie więcej niż porównywalne akceleratory produkowane przez firmy konkurencyjne bazujące na jednostkach GPU (ang. Graphics Processing Unit), które to osiągają dobre rezultaty w obliczeniach o pojedynczej precyzji, ale wykonywanie operacji o podwójnej precyzji jest ich słabym punktem.

Pierwszy prototypowy produkt z rodziny Intel Xeon Phi, o kodowej nazwie Knights Corner to pojedynczy koprocesor, wykonany w technologii 22 nm [4,13]. Wyposażony jest w jednostkę obliczeniową posiadającą ponad 50 rdzeni oraz co najmniej 8 GB pamięci GDDR5 (ang. Graphic Double Data Rate v³). Wydajność obliczeniowa jest zasługą wsparcia dla 512-bitowego SIMD⁴ (ang. Single Instruction, Multiple Data). Pierwsze superkomputery wykorzystujące koprocesor Intel Xeon Phi już działają. Najmocniejsza konfiguracja jest sklasyfikowana na 7 miejscu (dane styczeń 2013) w

³ GDDR5 – typ szybkich pamięci o bezpośrednim dostępie do dowolnej komórki pamięci

⁴ SIMD – przetwarzanie wielu strumieni danych za pomocą jednej instrukcji

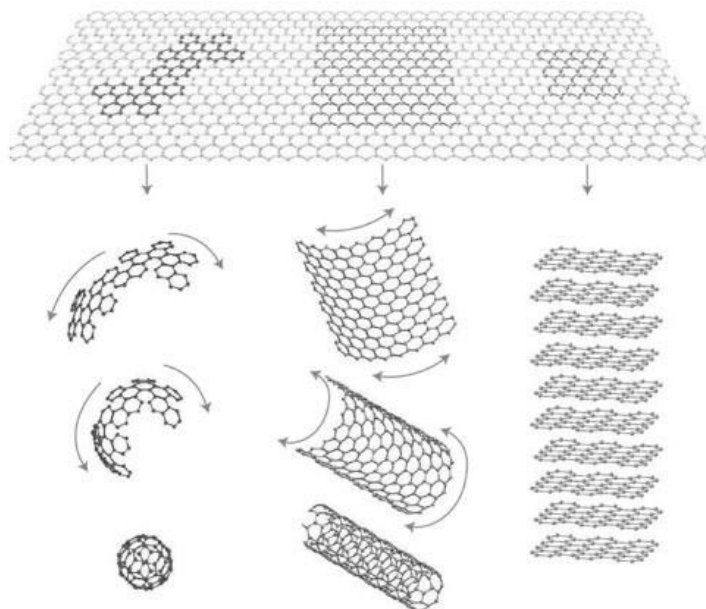
rankingu 500 najszybszych superkomputerów na świecie i nosi nazwę Stampede. Powstała na Texas Advanced Computing Center University of Texas. Łączna wydajność zbliża się do wartości 10 PetaFLOPsów [6,7]. Moc obliczeniową w 80% zapewniają omówione powyżej układy Kinghts Corner, a pozostałe 20% procesory Intel Xeon E5-2680 [6,7]. Superkomputer został uruchomiony i oddany społeczności naukowej w dniu 7 stycznia 2013 roku [6]. Jest jednym z największych na świecie wszechstronnych systemów dla otwartej społeczności naukowej, jako część programu National Science Foundation XSEDE (ang. Extreme Science and Engineering Discovery Environment).

Technologia Intel Xeon Phi to znaczący przełom dla rozwiązań o wysokiej mocy obliczeniowej ale również postęp w dążeniu do optymalizacji i zmniejszenia zapotrzebowania na energię superkomputerów. W efekcie superkomputer o nazwie Beacon należący do National Institute for Computational Sciences University of Tennessee zajął zaszczytne pierwsze miejsce w ranking energooszczędnych superkomputerów green500 (dane styczeń 2013) [14]. Maszyna ta osiągnęła wydajność na poziomie niecałych dwóch i pół miliarda operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę (GigaFLOPów) przy zapotrzebowaniu mocy wynoszącym 1 W, a tym samym ustawiła światowy rekord na tym poziomie. Komputery zbudowane były na platformie Intel Sandy Bridge wykorzystujące procesor z rodziny Intel Xeon. Każdy węzeł składa się z procesora Intel Xeon E5-2670 w połączeniu z czterem komprocesorami Intel Xeon Phi 5110P. Łącznie superkomputer Beacon osiąga moc obliczeniową na poziomie 112,2 TeraFLOPa, przy zapotrzebowaniu mocy wynoszącym 44,89 kW [14].

3. Alternatywne rozwiązania mogące poprawić wydajności jednostek obliczeniowych

Tranzystor to urządzenie, któremu zawdzięczamy istnienie komputerów w obecnej formie. Dotychczas do budowy tranzystorów używano krzemu. Dzięki miniaturyzacji, która została opisana Prawem Moore'a, we współczesnych mikroprocesorach producenci tych urządzeń są w stanie zmieścić już miliardy tranzystorów, których rozmiary mierzy się w nanometrach. Przemysł dociera w ten sposób do fizycznej granicy miniaturyzacji, za którą krzemowa elektronika zacznie ulegać zakłóceniom wynikającym z mechaniki kwantowej.

Jednym z rozwiązań jest zamiana krzemu na węgiel. Siatka z atomów węgla o grubości zaledwie jednego atomu nazywa się grafenem. Tę formę węgla charakteryzuje wysokie przewodnictwo elektryczne dzięki czemu materiał ten ma szansę w wielu zastosowaniach zastąpić krzem [11].



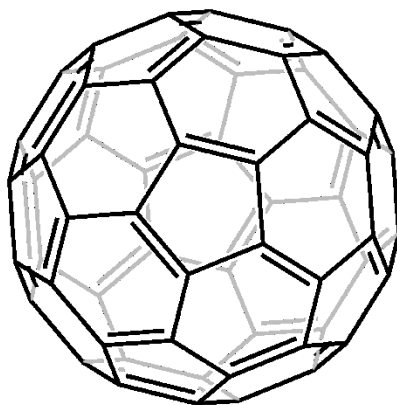
Rys. 3. Struktury molekularne fulerenów (buckyball, nanorurka, grafit) [9]

W związku z bardzo dobrymi właściwościami nadprzewodnikowymi i półprzewodnikowymi prowadzone są również badania nad innymi cząsteczkami złożonymi wyłącznie z atomów węgla. Przykładem są fulereny, cząsteczki składające się z parzystej liczby atomów węgla, tworzące zamkniętą, pustą w środku bryłę. Powierzchnia fulerenów składa się z układu sprzężonych pierścieni, z których każdy posiada pięć lub sześć atomów węgla (Rys. 3.) [8,9,15]. Najpopularniejszy fuleren, zawierający 60 atomów węgla (C₆₀) ma kształt dwudziestościanu ściętego i przypomina wyglądem piłkę nożną (ang. buckyball). Inną alotropową odmianą węgla jest cylindryczna nanostruktura nazwana nanorurką (CNT - carbon nanotubes) [15,16].

3.1. „Buckyball”

Buckyball – nazywany również Buckminsterfullerene od imienia i nazwiska jego twórcy i wynalazcy Buckminster Fullera. Jest najmniejszą cząsteczką z grupy fulerenów zawierającą pięciokątne i sześciokątne pierścienie (Rys.4) [8,9,15,16]. Dzięki takiej budowie zaczęto prowadzić badania nad ich zastosowaniem w wielu dziedzinach, w tym również do budowy układów półprzewodnikowych.

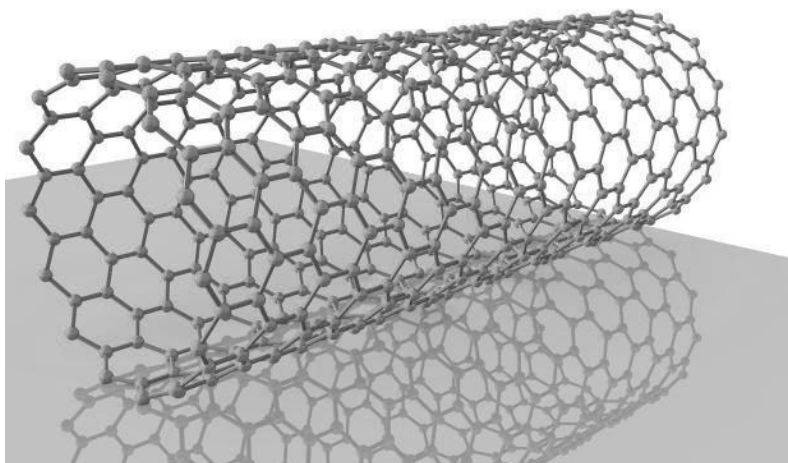
Wydajność tranzystorów wysokopolowych OFETs (ang. organic field-effect transistor) [10] i detektorów światła została poprawiona dzięki półprzewodnikowym właściwościom z domieszkowaniem donorowym fulerenów opartych na C₆₀, C₇₀ razem z C₈₄. Fulenowy tranzystor wysokopolowy OFETs wyprodukowany z C₈₄ wykazał większą mobilność i stabilność niż te z C₆₀ czy C₇₀. W momencie, kiedy wiele jest jeszcze do zrobienia, świat elektroniki polimerowej otwiera się zarówno dla fulerenów, jak i dla nanorurek jednowarstwowych [12].



Rys. 4. Struktura molekularna fulerenu C60 [17]

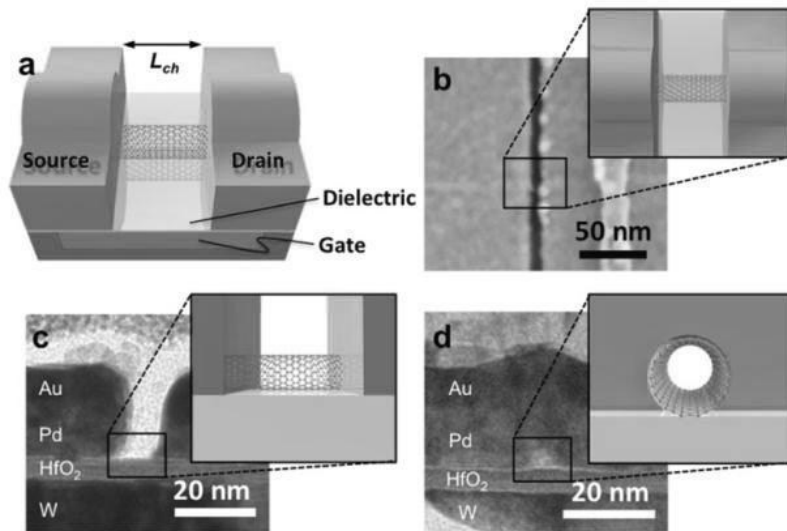
3.2. Nanorurki węglowe

W związku z postępem technologicznym i obniżaniem technologii wytwarzania tranzystorów, coraz trudniej zbudować tranzystory z kanałami krzemowymi półprzewodników. Jedne z alternatywnych projektów realizuje firma IBM (ang. International Business Machines Corporation). Prowadzone prace polegają na stworzeniu tranzystora z kanałem wykonanym z nanorurek węglowych [5,12,15,16].



Rys. 5. Model strukturalny nanorurki węglowej [9]

Unikalna struktura molekularna cząsteczki (Rys. 5) zapewnia nadzwyczajne właściwości makroskopowe, w tym wysoką wytrzymałość, przewodność elektryczną, plastyczność, przewodność cieplną i względną bierność chemiczną [5,12,15,16].

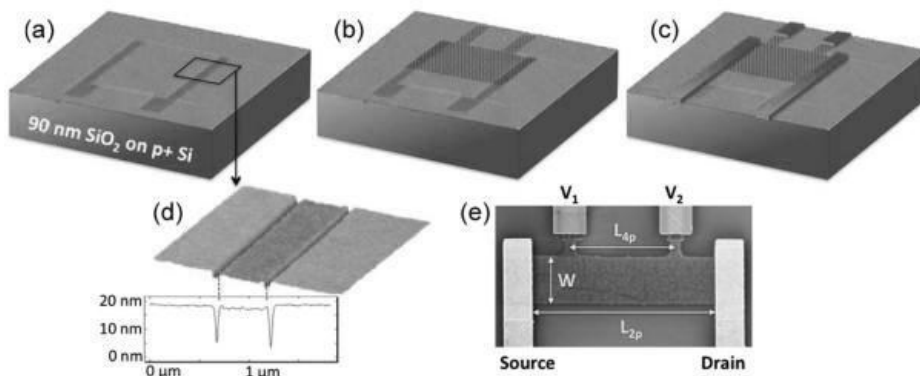


Rys. 6. Tranzystor z nanorurką węglową [9]

Rys. 6 przedstawia schemat ideowy (część a) oraz obraz rzeczywisty tranzystora z nanorurką węglową (część b - obrazuje widok z góry, c - przedstawia przekrój poprzeczny, d - widok z przodu).

3.3. Technologia podwójnej warstwy kontaktowej

Wykorzystanie grafenu w budowie tranzystorów wiąże się z pewnymi barierami. Największym problemem jest zintegrowanie go z innymi elementami układu. Inżynierowie firmy IBM stworzyli technikę polegającą na umieszczeniu grafenowej wstążki pomiędzy dwiema warstwami materiałów kontaktowych. Na rys. 7 przedstawiono etapy tworzenia tranzystora. Etap A pokazuje dolną warstwę kontaktową, etap B przedstawia dodanie grafenu i etap C ilustruje dodanie górnej części kontaktowej [9,12].



Rys. 7. Schemat wytwarzania tranzystora z rdzeniem grafenowym [9]

4. Wnioski

Od ponad półwieku pojęcie wydajności obliczeniowej jest synonimem pojęcia prędkości z jaką wykonywane są operacje zmiennoprzecinkowych. Ten szczególny nacisk doprowadził do powstania superkomputerów, które zużywają bardzo duże ilości energii elektrycznej i wytwarzają znaczne ilości ciepła, co wymaga tworzenia specjalistycznych urządzeń chłodniczych skonstruowanych w taki sposób, by zapewnić im prawidłowe działanie. Położenie nacisku na prędkość wykonywania obliczeń, jako najistotniejszego parametru, spowodowało, że inne parametry, takie jak niezawodność, dostępność i użyteczność są w dużej mierze ignorowane. W rezultacie nastąpił niezwykle wzrost całkowitego kosztu posiadania (TCO – ang. Total Cost of Ownership) superkomputera.

Analizując zestawienia rankingu energooszczędnych superkomputerów, napawa optymizmem trend, iż wydajność rośnie w szybszym tempie niż zużycie energii. Wynika z tego, że efektywność komputerów rośnie, ale problem ciągłego wzrostu konsumpcji mocy jest poważny i wymaga opracowania nowych rozwiązań i technologii.

Literatura

1. IntelPR: Intel Delivers New Architecture for Discovery with Intel® Xeon Phi™ Coprocessors. Intel, 12 listopad 2012. [dostęp 4 styczeń 2013] http://newsroom.intel.com/community/intel_newsroom/blog/2012/11/12/intel-delivers-new-architecture-for-discovery-with-intel-xeon-phi-coprocessors
2. Agam Shah: Intel ships 60-core Xeon Phi processor. Computerworld, 12 listopad 2012.
3. Johan De Gelas: The Xeon Phi at work at TACC. AnandTech, 14 listopad 2012. [dostęp 3 styczeń 2013] <http://www.anandtech.com/show/6451/the-xeon-phi-at-work-at-tacc>
4. Merritt, Rick, "Cray will use Intel MIC, branded Xeon Phi", 8 Jun 2012. [dostęp 20 grudzień 2012] <http://www.eetimes.com/electronics-news/4375500/Cray-will-use-Intel-MIC--branded-Xeon-Phi>
5. Stephen Shankland: IBM brings carbon nanotube-based computers a step closer. CNET, 28 październik 2012. [dostęp 19 grudzień 2012] http://news.cnet.com/8301-11386_3-57541381-76/ibm-brings-carbon-nanotube-based-computers-a-step-closer/
6. High Performance Computing (HPC) Systemy, Texas Advanced Computing Center. [dostęp 10 styczeń 2013] <http://www.tacc.utexas.edu/resources/hpc>
7. Top500 Supercomputer Sites, November 2012 Raports, Grudzień 2012. [dostęp 5 styczeń 2013] <http://www.top500.org/lists/2012/11/>
8. Janusz Chustecki: IBM zaprezentował najszybszy na świecie tranzystor grafenowy, IDG News Service, 8 lutego 2010. [dostęp 4 stycznia 2012] <http://www.networld.pl/news/355696/IBM.zaprezentowal.najszybszy.na.swiecie.tranzystor.grafenowy.html>
9. Stephen Shankland: Keeping Moore's Law ticking, 15 październik 2012. [dostęp 4 styczeń 2013] http://news.cnet.com/2300-1001_3-10013859.html
10. Metzger P.: Anatomia PC. Wydanie IX, Helion, 09.2004.
11. Colin Barras: Organic computing takes a step closer. New Scientist, 29 stycznia 2009. [dostęp 22 grudzień 2012] <http://www.newscientist.com/article/dn16506-organic-computing-takes-a-step-closer.html>
12. Gullapalli, S., Wong, M.S.: Nanotechnology: A Guide to Nano-Objects, Chemical

- Engineering Progress, 107, (5), 2011, 28–32.
13. Gareth Halfacree: Intel pushes for HPC space with Knights Corner. Net Communities Limited, UK, 20 czerwca 2011. [dostęp 20 grudzień 2012]
<http://www.thinq.co.uk/2011/6/20/intel-pushes-hpc-space-knights-corner/>
 14. Green500: Ranking of the most energy-efficient supercomputers in the world - November 2012 Raports, Grudzień 2012. [dostęp 5 styczeń 2013]
<http://www.green500.org/lists/green201211>
 15. Muc A., Chwał M.: Mechanical model of carbon nanotubes based composites. Composites, 4, 12, 2004, 432-438.
 16. Kwiatkowska M., Broza G., Męćfel J., Sterzyński T., Roslaniec Z.: Preparation and characterisation of pbt/carbo nanotubes polimer nanocomposites. Composites, 5, 2, 2005, 99-104.
 17. Katz, E. A.: Fullerene Thin Films as Photovoltaic Material. Elsevier, Amsterdam, 2006, 361-443.

Dr hab. inż. Marcin Lorenc, prof. PO
Mgr inż. Krzysztof Cegielski
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax.: (0-77) 423 40 44
e-mail: m.lorenc@po.opole.pl
k.cegielski@po.opole.pl

Mgr Aleksandra Cegielska
Zakład Środków Powierzchniowo Czynnych
Instytut Ciężkiej Syntezy Organicznej „Błachownia”
ul. Energetyków 9
47-225 Kędzierzyn-Koźle
tel./fax.: (0-77)487 34 70
e-mail: cegielska.a@ icso.com.pl