

Bogusław WIĘCEK, Marcin LIS, Sławomir ZWOLENIK, Remigiusz DANYCH, Tomasz WAJMAN

POLITECHNIKA ŁÓDZKA INSTYTUT ELEKTRONIKI
ZESPÓŁ TERMOGRAFII KOMPUTEROWEJ

Zastosowanie termowizji w badaniach nieniszczących i w mikroelektronice

dr hab. inż. Bogusław WIĘCEK

Urodził się w 1956r. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej i od 1980r. pracuje w Instytucie Elektroniki. Obecnie zajmuje się modelowaniem złożonej wymiany ciepła w układach i przyrządach elektronicznych oraz opracowaniem i wdrażaniem nowych rozwiązań sprzętowo-programowych dla termografii



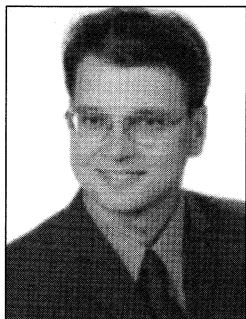
mgr inż. Marcin LIS

Urodził się w 1977r. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej. Obecnie jest słuchaczem pierwszego roku Studium Doktoranckiego na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki PŁ oraz asystentem w Instytucie Elektroniki. Zajmuje się zagadnieniami rozprzysku ciepła w półprzewodnikowych przyrządach mocy do montażu powierzchniowego.



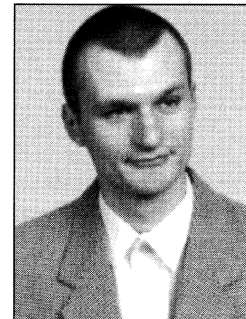
mgr inż. Sławomir ZWOLENIK

Urodził się w 1973r. Ukończył studia na Wydz. Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. W 1998r. podjął pracę w Instytucie Elektroniki na stanowisku asystenta. Zajmuje się przede wszystkim oprogramowaniem oraz systemami akwizycji i przetwarzania obrazów termowizyjnych, a także symulacją i badaniami zjawisk związanych z przepływem ciepła.



mgr inż. Remigiusz DANYCH

Urodził się w 1976r. Ukończył studia na Wydz. Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. W 2001r. podjął pracę w Instytucie Elektroniki na stanowisku asystenta, jest słuchaczem pierwszego roku Studium Doktoranckiego. Zajmuje się projektowaniem interfejsów oraz oprogramowania dla potrzeb termowizji.



mgr Tomasz WAJMAN

Urodził się w 1976r. Ukończył studia na Wydz. Fizyki i Chemii Uniwersytetu Łódzkiego, w zakresie fizyki teoretycznej. Od 2001 r. pracuje w Instytucie Elektroniki PŁ na stanowisku asystenta. Zajmuje się niewymuszonym przepływem ciepła i masy w mikrokanalach oraz przemianami fazowymi, w zastosowaniu do chłodzenia układów elektronicznych.



Wstęp

Pole zastosowań termowizji jest bardzo ogromne i ciągle się poszerza dlatego trudno jest w ramach jednego artykułu zamieścić wszystkie potencjalne możliwości. Jednym z głównych zagadnień jakimi zajmuje się nasz zespół jest integracja systemów termowizyjnych i optycznych. Efektem tych prac są interfejsy do komputerów PC oraz laptopów. W dziedzinie badań naukowych prowadzone są prace w zakresie zastosowania termowizji w badaniach zjawisk cieplnych zachodzących w układach elektronicznych. Badania nasze nie są skupione jednak tylko na elektronice. Zespół w współpracy z innymi ośrodkami akademickimi prowadzi badania termowizyjne w medycynie jak również i budownictwie. Zespół Termografii komputerowej jest jednym ze współorganizatorów konferencji Termografia i Termometria w Podczzerwieni, która przedstawia osiągnięcia polskich naukowców w dziedzinie termowizji. Przedstawione zostaną najważniejsze zagadnienia jakimi zajmował się i nadal się zajmuje Zespół Termografii Komputerowej. Na łamach artykułu zostaną omówione następujące zagadnienia: projektowanie radiatorów układów scalonych VLSI w warunkach chłodzenia konwekcyjnego, wykorzystanie rur cieplnych w chłodzeniu układów elektronicznych, pompa kapilarna i jej zastosowania w chłodzeniu układów elektronicznych VLSI, badania nieniszczące materiałów z wykorzystaniem fali cieplnej, interfejsy do kamer termowizyjnych wraz z oprogramowaniem.

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia jakimi zajmuje się Zespół Termografii Komputerowej Instytutu Elektroniki PŁ. Ponieważ zastosowania termowizji są bardzo ogromne i wciąż rosną, dlatego autorzy wybrali następujące zagadnienia, które są obecnie realizowane: projektowanie interfejsów do kamer termowizyjnych i integracja systemów, projektowanie radiatorów układów scalonych VLSI, wykorzystanie własności dynamicznych rur cieplnych w chłodzeniu układów elektronicznych. Przedstawione zostały również nowe zagadnienia, którymi zajmuje się zespół, takie jak badania nieniszczące z wykorzystaniem fali cieplnej jak również chłodzenie układów elektronicznych z wykorzystaniem pompy kapilarnej.

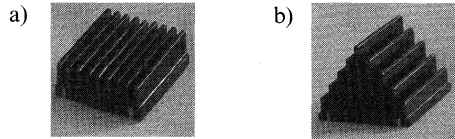
Abstract

In this article, an overview of thermography applications developed in the Institute of Electronics, Technical University of Lodz are presented. The growing interest of thermography in various field of applications is observed. In the domain of scientific investigations, thermography is successfully applied for modelling cooling systems in microelectronics, including phase change solutions. Additionally, dynamic thermography is widely used in non destructive testing in material science. Thermal wave method and pulse thermography are applied.

Projektowanie radiatorów układów scalonych VLSI w warunkach chłodzenia konwekcyjnego

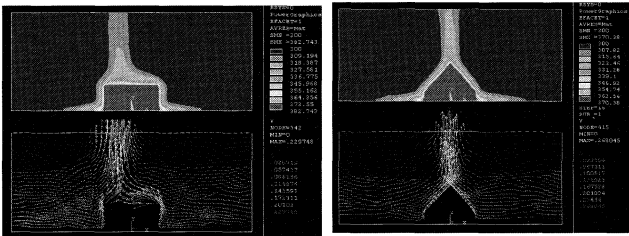
W typowym współczesnym układzie VLSI moc wydzielana dochodzi do kilkudziesięciu watów, przy gęstościach mocy źródeł ciepła rzędu kilkuset MW/m³. Odprowadzenie energii do otoczenia staje się więc problemem niezwykle ważnym i decyduje o niezawodności układów. Układy scalone umieszczane są w obudowach epoksydowych lub ceramicznych, przy czym te ostatnie charakteryzują się lepszymi parametrami cieplnymi. Element scalony w urządzeniu może być usytuowany zarówno pionowo jak i poziomo. Często dla poprawy warunków chłodzenia stosuje się radiatoro-

ry chłodzone wymuszonym ruchem gazu. Warunki chłodzenia elementów układu elektronicznego (w tym radiatorów) zależą od kierunku ruchu gazu, który otacza źródło ciepła. Rozważono dwa typy radiatorów: standardowy o równomiernie rozłożonych żebrach chłodzących, przy jednakowej ich wysokości, oraz radiator z uźebrowaniem profilowanym (rys. 1).



Rys. 1. Radiatory układów VLSI dla pracy poziomej: a) standardowy o równomiernych żebrach chłodzących, b) radiator z uźebrowaniem profilowanym, podstawa radiatorów – 44x44mm

Celem stosowania radiatora z uźebrowaniem profilowanym jest zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła w środku radiatora, gdzie zwykle występuje źródło ciepła. W górnej części radiatora współczynnik przejmowania ciepła dla konstrukcji standardowej jest najmniejszy. Symulacje potwierdziły oczekiwania co do rozkładu współczynnika przejmowania ciepła wzdłuż konturu radiatora. Najmniejsza wartość współczynnika (najgorsze warunki odprowadzania ciepła) występują na górnej płaszczyźnie radiatora (rys. 2).



Rys. 2. Układ VLSI z radiatorem standardowym – rozkłady temperatury o uźebrowaniu profilowanym – rozkład prędkości cząstek powietrza, $P_1=15\text{MW/m}^2$
Rys. 3. Układ VLSI z radiatorem uźebrowaniem profilowanym – rozkłady temperatury i prędkości cząstek powietrza, $P_1=15\text{MW/m}^2$

Podobnie jak dla radiatora standardowego przyjęto konstrukcję zwartą. Uźebrowanie zastąpiono materiałem litym. Służność takiego uproszczenia potwierdziły symulacje (rys. 3). Radiator o kształcie trójkątnym charakteryzuje się znacznie lepszymi parametrami oddawania ciepła do otoczenia. Minimalna wartość współczynnika przejmowania ciepła wynosi ok. $5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (dla radiatora standardowego wynosiła $3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$). Średnia wartość tego współczynnika jest większa o ponad $1\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ w porównaniu z analogiczną wartością dla radiatora standardowego, co oznacza wzrost rzędu 20%. Wyniki symulacji uzyskane za pomocą programu ANSYS5.4 porównano z wynikami pomiarów termograficznych. Wyznaczono średnie współczynniki przejmowania ciepła oraz rezystancje termiczne radiatorów. Pomiarzy temperatury potwierdziły efektywność chłodzenia układu przy zastosowaniu radiatorów z uźebrowaniem profilowanym w warunkach konwekcji naturalnej. Ponadto potwierdzono praktycznie równomierny rozkład temperatury na powierzchni radiatora w stanie ustalonym (rys. 4).



Rys. 4. Termogramy dla układu mikroprocesora Intel-486^s chłodzonego radiatorem standardowym o jednakowych żebrach ($T_{\text{max}}=47,5^\circ\text{C}$) oraz z uźebrowaniem profilowanym ($T_{\text{max}}=41,8^\circ\text{C}$), $P_1=1,2\text{W}$

Wyniki badań wskazują, że optymalizacja kształtu radiatorów układów scalonych pracujących poziomo prowadzi do poprawy warunków chłodzenia. W konstrukcjach układów elektronicznych umieszczonych na podłożu ze szkła epoksydowego ponad 50%

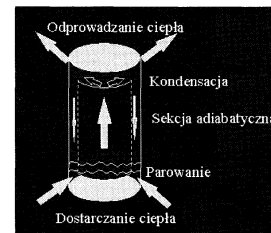
mocy rozpraszane jest przez radiator do otoczenia drogą konwekcji naturalnej, pozostała część przedostaje się drogą przewodnictwa cieplnego przez podłoże. W takich przypadkach dobór kształtu radiatora jest bardzo ważny, szczególnie w warunkach konwekcji naturalnej.

Wykorzystanie rur cieplnych w chłodzeniu zespołów i układów elektronicznych

Rura cieplna (nazywana również ciepłowodem – *ang. heat pipe* – rys. 5) jest zamkniętym pojemnikiem najczęściej w formie cienkościennej rury, wykorzystującym parowanie i skraplanie zawartej w nim cieczy oraz zjawisko włoskowatości, do przenoszenia ciepła z jednego jej końca w drugi. Rura cieplna stanowi hermetycznie zamknięty pojemnik wewnątrz znajduje się pewna ilość cieczy. Wewnątrz rury panuje ściśle określone ciśnienie (najczęściej nieco niższe od atmosferycznego), umożliwiające intensywne parowanie cieczy w ściśle określonej temperaturze. Wewnętrzna powierzchnia ścianek pojemnika pokryta jest materiałem porowatym. Ilość cieczy zawarta w rurze jest tak dobrana, aby nastąpiło całkowite nasytzenie materiału porowatego. W wyniku dostarczenia ciepła do jednego z końców rury zawarta w materiale porowatym ciecz paruje, powodując tym samym lokalny wzrost ciśnienia w tej części rury. Na skutek różnicy ciśnień pomiędzy ciepłym a chłodnym końcem rury następuje przemieszczanie oparów cieczy do chłodniejszego końca, gdzie ulegają skropleniu, oddając zgromadzone ciepło. Ciecz powstała w wyniku skropleniu wnika w materiał porowaty, pokrywający ścianki pojemnika. Następnie na skutek działania sił kapilarnych następuje powrót cieczy do gorącego końca rury i cały cykl ulega powtórzeniu.

Pod względem termicznym w rurze cieplnej możemy wyszczególnić trzy obszary:

- sekcję parowania (parownik) – do której doprowadzamy ciepło z zewnątrz
- sekcję skraplania (skraplacz) – stanowiącą jednocześnie miejsce odprowadzenia ciepła
- znajdującą się pomiędzy poprzednimi dwoma sekcję adiabatyczną (izotermiczną)



Rys. 5. Zasada działania i budowa wewnętrzna rury cieplnej.

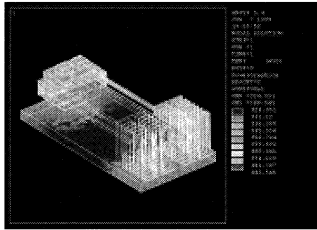
W porównaniu z elementami przenoszącymi ciepło zbudowanymi z materiałów stałych (miedź, stal) zastosowanie rury cieplnej charakteryzuje się następującymi zaletami:

- mały czas bezwładności rury co jest szczególnie istotne dla układów elektronicznych które szybko się nagrzewają
- fizyczne odseparowanie sekcji przyjmowania i rozpraszania ciepła bez wiążącego się z tym (w materiałach stałych) znacznego spadku temperatury.

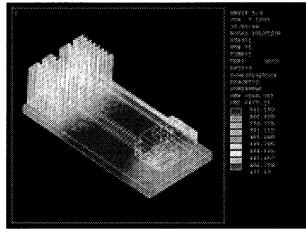
Sekcja parowania i skraplania pracują niezależnie od siebie (potrzebują tylko wspólnego strumienia: cieczy i jej oparów), a co za tym idzie parownik i skraplacz mogą mieć różne kształty i budowę.

Wynikiem prowadzonych badań było opracowanie systemu chłodzenia półprzewodnikowych elementów mocy z wykorzystaniem własności dynamicznych rur cieplnych. Podczas badań wykonano symulację badanego układu w programie ANSYS5.6 (rys. 6 i 7) a następnie zweryfikowano wyniki symulacji metodą termowizyjną. Widok prototypowego systemu chłodzenia przedstawia rysunek 9. Na rysunku 10 przedstawiono obraz termowizyjny układu temperatury w zaprezentowanym układzie chłodzenia. Cha-

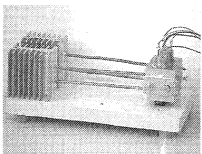
rakterystyki porównawcze wyników symulacji i pomiarów przedstawiają rysunki 11 i 12.



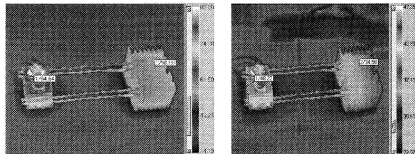
Rys. 6. Wyniki symulacji modelu 3D przy mocy źródła 82,3 W i konwekcji naturalnej



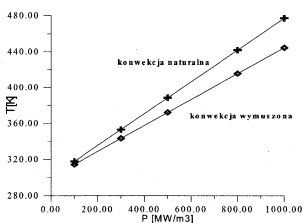
Rys. 7. Wyniki symulacji modelu 3D przy mocy źródła 164,6 W i konwekcji naturalnej



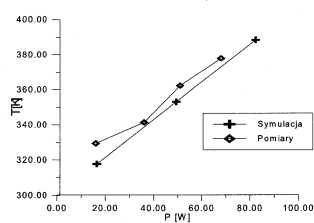
Rys. 8. Prototypowy system chłodzenia półprzewodnikowych elementów mocy



Rys. 9. Obraz termowizyjny rozkładu temperatury



Rys. 10. Wyniki symulacji Przeprowadzone w programie ANSYS5.6



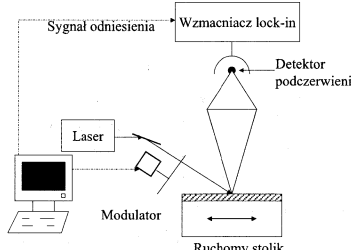
Rys. 11. Charakterystyka porównawcza wyników symulacji i pomiarów termowizyjnych dla konwekcji naturalnej

Rury ciepłe mogą być elementem efektywnego systemu chłodzenia układów elektronicznych. Rozdzielenie miejsca doprowadzenia mocy i miejsca chłodzenia. Przewodność cieplna $< 4000\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Krótki czas transportu energii

Badania nieniszczące materiałów metodą fali ciepłej

Zastosowanie termografii w badaniach nieniszczących polega na bezkontaktowym pomiarze temperatury badanego obiektu, przy czym rozkład temperatury wynika z dostarczonej energii oraz parametrów struktury, w tym głównie lokalnych wartości przewodności cieplnej λ , gęstości ρ oraz ciepła właściwego c_p . Pierwsze udokumentowane badanie potwierdzające istnienie pola temperatury zmiennego w czasie (które nazwano falą ciepłą) przeprowadzono w poprzednim stuleciu. Zastosowano dwa strumienie płynu o różnej temperaturze, co pozwoliło uzyskać zmienną w czasie odpowiedź termiczną układu.

Późniejsze prace doprowadziły do opracowania synchronicznego pomiaru temperatury (rys 12), w którym wykazano, że nie tylko amplituda, lecz także faza odpowiedzi układu niesie informację o właściwościach termicznych badanego obiektu.



Rys. 12. Termografia synchroniczna – lock-in (Nordal i Kanstad – 1979)

Obecnie wśród technik badań nieniszczących można wyróżnić m.in.:

- Termografię synchroniczną optyczną (lock-in)
- Termografię synchroniczną ultrasonograficzną (lock-in)
- Termografię impulsową z wymuszeniem prostokątnym
- Termografię impulsową z wymuszeniem krótkotrwałym

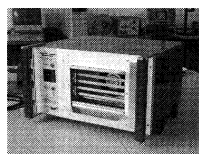
Optyczna termografia synchroniczna polega na pobudzeniu badanej próbki periodycznym zmiennym promieniowaniem ciepła o częstotliwości w zakresie 0.01-10Hz. W metodzie ultrasonograficznej, źródłem energii jest fala akustyczna o częstotliwości 20-40kHz, modulowana składową niskiej częstotliwości w zakresie 0.01-10Hz. Moc emitera energii w obu przypadkach waha się w granicach od kilkuset do kilku tysięcy watów.

W termografii impulsowej wymuszeniem jest jednokrotny impuls energii, który w zależności od czasu trwania dzieli ją na termografię wymuszeniem prostokątnym ($t_{imp} = 1-5\text{s}$), oraz z wymuszeniem krótkotrwałym ($t_{imp} = 1-20\text{ms}$). Energie impulsów sięgają nawet dziesiątek kJ przy krótkich impulsach i są nieznacznie mniejsze dla impulsów o dłuższym czasie trwania.

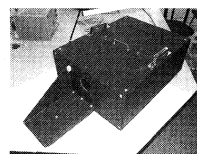
Dodatkowo należy podkreślić, że badania (pomiar rozkładu temperatury) można przeprowadzać zarówno po stronie czołowej (pobudzanej energią), lub tylnej (nieoświetlonej).

W ramach badań prowadzonych w Zespole Termografii Komputerowej powstało stanowisko do badań nieniszczących (NDT) przedstawione na rysunku 13. Jest to stanowisko wyposażone w cztery promienniki podczerwieni o mocy 500W każda. Urządzenie wyposażone w mechaniczny „shuter” (ruchome kłapy) pozwalający na przesłonięcie lamp. Lampy pogrupowane w pary oraz „shuter” mogą być sterowane z komputera lub ręcznie. Opracowano dodatkowy moduł do istniejącego oprogramowania pozwalający na sterowanie i synchronizację procesu pomiarowego. Możliwe jest uzyskanie mocy wypromieniowanej 1 lub 2kW oraz sterowanie momentem włączenia/wyłączenia lamp oraz mechanicznej przesłony. Drugie stanowisko (rys. 14) powstało jako niektórych wyniku doświadczeń nabytych podczas pierwszych prób niektórych pierwszym stanowiskiem, oraz niektórych wyniku chęci przetestowania innego rodzaju innego, impulsowego rodzaju pobudzenia. Sercem układu jest lampa błyskowa, pobudzana do wyładowania przez specjalnie do tego celu zbudowany układ wyzwalacza. Cały układ próbka-lampa-obiektyw kamery umieszczony jest wewnątrz zamkniętej obudowy w celu eliminacji wpływu zjawisk zakłócających pomiar: odbici, zewnętrznych źródeł i przypadkowego chłodzenia próbki.

Dzięki temu stanowisku istnieje możliwość generowania krótkich pojedynczych impulsów. Minimalny czas przetwarzania układu wyładowczego wynosi 7s. Możliwe jest regulacja odległości próbki od kamery oraz umieszczenie lampy wyładowczej w różnych układach (przed i za próbka).



Rys. 13. Stanowisko do termografii synchronicznej z mechaniczną przesłoną



Rys. 14. Stanowisko do termografii impulsowej z mechaniczną przesłoną

Pompa kapilarna i jej zastosowanie w chłodzeniu układów elektronicznych VLSI

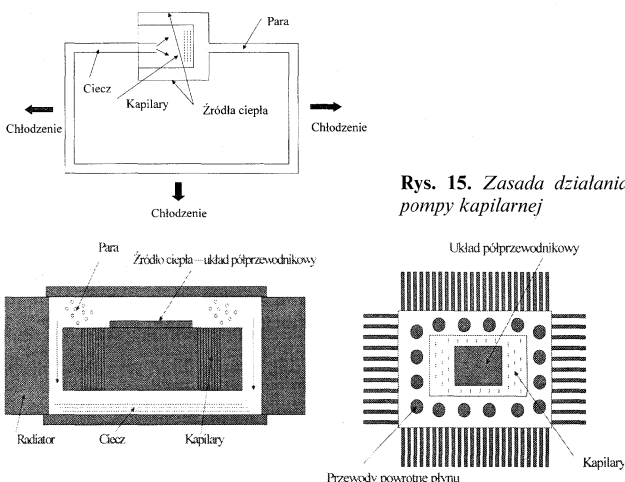
Celem naukowym projektu jest weryfikacja teoretyczna i eksperymentalna skuteczności chłodzenia układów elektronicznych przy zastosowaniu przepływu cieczy przez mikrokanały zintegrowane z układem elektronicznym. Przepływ medium chłodzącego i wysoka skuteczność chłodzenia wynika z istnienia sił kapilarnych. Wzrost mocy wydzielanej we współczesnych układach elektronicznych mocy rodzi potrzebę konstrukcji nowych, efektywnych systemów chłodzenia.

Kluczowym problemem jest więc szybkie odprowadzenie ciepła w małym obszarze przy użyciu elementów o bardzo dużej przewodności cieplnej. Jednym ze znanych rozwiązań jest stosownie rur cieplnych, co zostało potwierdzone badaniami teoretycznymi i eksperymentalnymi. Stosuje się chłodzenie wymuszone gdzie czynnikiem chłodzącym jest gaz lub ciecz. Znane są pierwsze próby zastosowania chłodzenia z wrzącą cieczą, choć tego typu rozwiązania są trudne w praktycznej realizacji.

W projekcie przewiduje się zastosowanie chłodzenia mikrokanalowego z wymuszonym i samoczynnym ruchem płynu chłodzącego, powstałym w wyniku istnienia sił kapilarnych (pompa kapilarna) – rys. 15. Pomysł odprowadzania ciepła przy użyciu pompy kapilarnej jest znany w teorii i został zrealizowany w praktyce, np. w aplikacjach kosmicznych. Pompa kapilarna wykorzystuje parowanie cieczy do skutecznego odprowadzania ciepła z układu elektronicznego. Para ulega skropleniu przy radiatorze, po czym wraca w obiegu zamkniętym do źródła ciepła przez naczynia włosowate, w wyniku istnienia sił kapilarnych. Pompa kapilarna istotnie różni się od rury cieplnej, przede wszystkim istnieniem osobnych kanałów do transportu pary i cieczy oraz tym, że o ile w rurze cieplnej naczynia włosowate występują na całej długości o tyle w pompie kapilarnej jedynie w okolicy źródła ciepła, co zwiększa zdolność pompy do odprowadzania dużej energii z niewielkiego obszaru. Ponadto kapilary w rurach cieplnych mają bardzo złożone kształty, co uniemożliwia integrację technologiczną klasycznej rury cieplnej w układzie elektronicznym przy użyciu typowych technologii wytwarzania układów VLSI. W pompie kapilarnej kanały mają zwykle przekrój kwadratu lub prostokątu. W mikroelektronice użycie kapilarnego systemu chłodzenia jest szczególnie atrakcyjne ze względu na:

- możliwość technologicznej integracji systemu półprzewodnikowego z systemem chłodzenia poprzez zastosowanie technologii mikroukładów MEMS,
- możliwość zbliżenia na odległość kilkuset mikrometrów naczyni włosowatych do źródła ciepła, a przez to uzyskanie zdolności układu chłodzenia do odprowadzania strumienia ciepła na poziomie kW/cm.

W ramach projektu planuje się wykonanie modelowej struktury układów chłodzenia przy użyciu pompy kapilarnej. Przykładową strukturę dla mikrokanalów wykonanych na podłożu metalicznym przedstawiono na rys. 16.



Rys. 16. Przykład systemu chłodzenia mikrokanalowego układu elektronicznego z pompą kapilarną w podłożu metalicznym

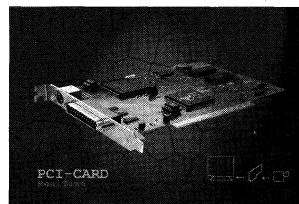
Interfejsy do kamer termowizyjnych wraz z oprogramowaniem

- Podstawowe cele jakie zostały postawione przed zaprojektowaniem interfejsu: obsługa kamery termicznej oraz kilku (do 4) kamer CCD oraz rejestracja i przetwarzanie szybkozmiennych procesów termicznych

- duża rozdzielczość otrzymywanych obrazów (max 800x600) przy zachowaniu kwadratowego piksela, pomocnego przy pomiarze geometrycznym

Jej przeznaczeniem jest obserwacja szybko zmieniających się procesów termicznych z możliwością podglądu wideo obserwowanego obiektu, docelowo także pomiar i wyznaczenie odległości i gabarytów badanych obiektów oraz jego trójwymiarowe zamodelowanie w pamięci komputera. Karta posiada 4 niezależne wejścia z kamer CCD z tym ograniczeniem, że w danej chwili analizowany i przetwarzany jest tylko jedno z wejść. Maksymalna rozdzielczość jaką można uzyskać do analizy to 800x600. Jednak praktyczne pole odczytowe niosące informacje o obrazie jest mniejsze 768x576. Wynika to z chęci zachowania tzw. kwadratowego piksela. Pozwala on na zachowanie proporcji poziomych i pionowych w stosunku 1:1. Dzięki temu uzyskane obrazy można wykorzystać do celów fotometrycznych, a także upraszczać inne obliczenia związane z analizą takiego obrazu. Na karcie znajduje się także niezależne wejście z kamery termograficznej. Istnieje możliwość równoczesnego w czasie zapisu jednego z obrazów wideo i obrazu termo – kanały wideo i termo pracują niezależnie co nie wyklucza ich synchronizacji. Zastosowana szybka pamięć VRAM pozwala na tymczasowy zapis 2 obrazów wideo z 256 stopniami szarości oraz 2 obrazów termo z 256 stopniową paletą.

Opracowano interfejs w postaci karty PCI (rys. 17) do komputerów PC, jak również interfejs PCMCIA zarówno do komputerów stacjonarnych i laptopów (rys. 18). Interfejs służy do rejestracji i przetwarzania szybko-zmiennych procesów termicznych, z możliwością jednoczesnej rejestracji obrazów optycznych dla celów łatwej i szybkiej interpretacji termogramów. System może być rozbudowany i można przy jego pomocy rejestrować jednocześnie obrazy optyczne z kilku kamer, co pozwala na trójwymiarową rekonstrukcję przestrzeni i pomiar odległości.



Rys. 17. Interfejs PCI



Rys. 18. Interfejs PCMCIA

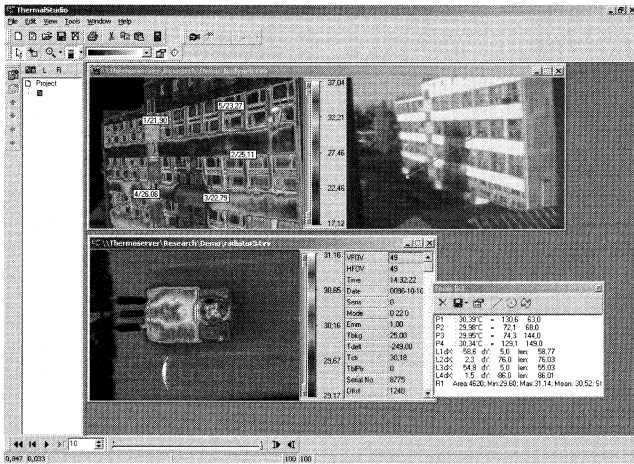
Warstwa aplikacyjna – zawierająca jednolity interfejs użytkownika oraz procedury obróbki zgromadzonych danych. Do podstawowych funkcji należą:

- jednolity, konfigurowalny przez użytkownika interfejs graficzny,
- rejestracja obrazów w dowolnych konfiguracjach pomiarowych (1 kamera termiczna, do 4 monochromatycznych kamer CCD w dowolnej zadanej rozdzielczości przestrzennej i czasowej),
- monitoring – „live video” – podgląd zmieniającego się obrazu w czasie rzeczywistym,
- zapamiętywanie zarejestrowanych obrazów, dowolnych ich sekwencji z zadaniem interwałem czasowym oraz wyników analizy,
- eksport obrabianych obrazów w popularnych formatach graficznych w celu umożliwienia ich obróbki przez inne oprogramowanie,
- import obrazów z formatów stosowanych przez kamery termiczne (Inframetrics Tiff),
- wydruk obrazów, kopiowanie przez schowek.

Dostępne są proste narzędzia pozwalające na obiektywną i szybką interpretację wyników: odczyt temperatury dowolnego punktu, ustawianie znaczników – punktów referencyjnych pozwalających na zbieranie danych z wielu punktów, dowolny i elastyczny zoom obrazu, dowolne przekroje temperaturowe, tworzenie histogramów.

Pozwala to na korekcję emisyjności oraz promieniowania pod względem odległości od obserwowanego obiektu oraz nachylenia powierzchni emitującej. Powstała aplikacja ThermalStudio, dzięki

obiektywnej strukturze projektu, może w naturalny sposób obsługiwać wiele dokumentów jednocześnie (ang. MDI – Multi Dokument Interface). Poza tym, że jest to duże ułatwienie dla użytkownika, daje możliwość rozbudowy interfejsu o nowe funkcje związane z wielokrotnym przetwarzaniem i łączeniem różnych obrazów (rys. 19).



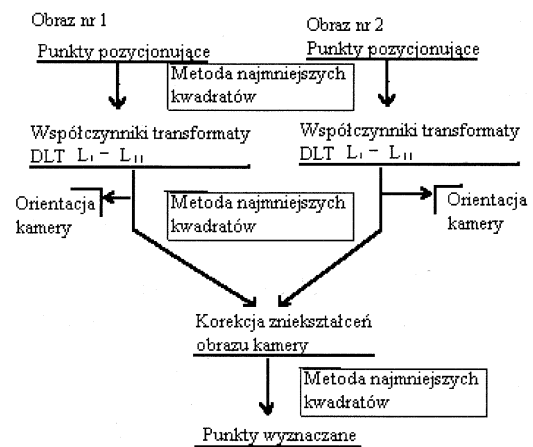
Rys. 19. Ogólny widok interfejsu użytkownika programu ThermalStudio

Końcowym efektem praca nad interfejsami do komputerów PC było opracowanie systemu termalno – optycznego (rys. 20). System ten może współpracować z różnego rodzaju kamerami termowizyjnymi (np. Inframetrics, Agema) jak również wizyjnymi. Znalazł on zastosowanie do badań w elektronice jak również budownictwie, medycynie, włókiennictwie, energetyce etc. Cały system współpracuje z programem ThermalStudio.

System termiczno-optyczny z rysunku 20 jest również wykorzystywany z powodzeniem do rekonstrukcji sceny trójwymiarowej. Rekonstrukcja trójwymiarowa (3D) sceny służy do wyznaczenia współrzędnych trójwymiarowych na podstawie dwóch lub więcej obrazów (w dwuwymiarowych). Danymi wyjściowymi do obliczania tych współrzędnych s (najczęściej współrzędne dwuwymiarowe (na obrazach uzyskanych z kamer video lub termicznych) kilku punktów (w o znanych współrzędnych 3D (zwanymi dalej w tekście punktami pozycjonującymi). Na tej podstawie można następnie wyliczyć kolejno współczynniki transformacji trójwymiarowej sceny na dwuwymiarową powierzchnię (przetwornika CCD kamery a następnie poprzez niejako przekształcenie odwrotne, współrzędne 3D wybranych na obrazach 2D punktów.



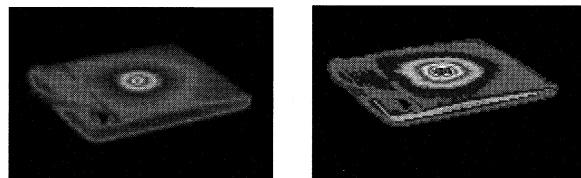
Rys. 20. System termiczno-optyczny do badań cieplnych opracowany w Zespole Termografii Komputerowej



Rys. 21. Przebieg algorytmu DLT

Znajomość położenia punktów w przestrzeni 3D pozwala na dokonanie korekcji temperatury uzyskanych z termogramów poprzez uwzględnienie nachylenia płaszczyzny obserwowanej do płaszczyzny przetwornika CCD. Spośród algorytmów (w testowanych przez autora (w do ostatecznej implementacji wykorzystano metod (zwaną DLT (ang. *Direct Linear Transformation*)). Ogólny schemat przebiegu tego algorytmu przedstawiono na rysunku 21.

Przykład korekcji temperatury na obserwowanej powierzchni wykonany przy użyciu systemu termalno-optycznego i programu ThermalStudio pokazuje rysunek 22.



Rys. 22. Przykład korekcji temperatury na termogramie wykonanym pod dużym kątem (lewe zdjęcie – termogram przed korekcją, prawe – po korekcji)

Podsumowanie

System termograficzny do zastosowań w elektronice i medycynie został wyróżniony na II Międzynarodowych Targach Nowych Technologii, Innowacji i Wzornictwa Przemysłowego, INTERTECHNOLOGY'99 w Łodzi. Prace badawczo-naukowe jakie obecnie trwają skupiają się głównie na zastosowaniu termowizji w różnych dziedzinach nauki i techniki. Rozwój i udoskonalenie termografii impulsowej i nieinwazyjnych metod oceny stanu materiałów znacznie uprości diagnostykę defektów. Nowe układy chłodzenia dla elektroniki w obecnej dobie wzrostu integracji układów scalonych i mocy rozpraszanej na jednostce powierzchni poprawią sprawność i warunki pracy tychże układów. **Elektronika cały czas poszukuje nowych materiałów o lepszych własnościach termicznych które są oceniane i badane metodą termowizyjną. Potencjalne możliwości termowizji są bardzo duże i nie ma wyraźnej granicy jej zastosowań.**