

Zbigniew SUSZYŃSKI, Michał BEDNAREK

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I INFORMATYKI, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin
SZKOŁA GŁÓWNA SŁUŻBY POŻARNICZEJ, WYDZIAŁ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA POŻAROWEGO, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa

Wykrywanie wad termokompresji w strukturach tyrystorów dużej mocy za pomocą termografii impulsowej**Dr hab. inż. Zbigniew SUSZYŃSKI**

Studiował na Wydziale Techniki Elektronowej Politechniki Kijowskiej na Ukrainie. Pracę doktorską obronił na tym samym Wydziale w 1991. Kolokwium habilitacyjne odbyło się przed Radą Naukową Instytutu Technologii Elektronowej PAN w Warszawie w 2001r. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania dynamicznych procesów cieplnych w ciałach stałych, mikroskopii termofalowej, termografii aktywnej, metod pomiaru parametrów cieplnych struktur warstwowych ale również przetwarzania i rozpoznawania obrazów i sygnałów.

e-mail: zbigniew.suszynski@tu.koszalin.pl**Mgr Michał BEDNAREK**

Urodził się w 1970 roku. Jest absolwentem Wydziału Fizyki i Astronomii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Od 1996 roku pracuje w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Zainteresowania naukowe: diagnostyka termowizyjna, termowizja aktywna, elektronika.

e-mail: mbed@sgsp.edu.pl**Streszczenie**

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania funkcji korelacji do przetwarzaniu sekwencji obrazów kontrastowych uzyskanych metodą termografii impulsowej. Metoda pozwala na wyodrębnienie obszarów powierzchni badanego elementu znajdujących się nad niejednorodnością cieplną występującą w strukturze. Badania wykonano na elementach warstwowych stosowanych do produkcji tyrystorów dużej mocy. Niejednorodność występująca w takich elementach związana jest z występowaniem defektów w obszarze przejściowym pomiędzy krzemem i molibdenem powstałym w trakcie termokompresji.

Słowa kluczowe: termografia impulsowa, korelacja, struktura warstwowa, obrazy kontrastowe, przetwarzanie obrazów.

Detection of thermocompression failures in high-power thyristor structures using pulsed thermography**Abstract**

Active thermography with pulse excitation is a diagnostic method enabling fast visualisation of thermal heterogeneity present in the volume of layered structures of semiconductor components. To improve the results obtained, when simultaneously increasing the detectability of heterogeneities related to structure defects, it is necessary to apply image processing methods. The studies were carried out for components used to manufacture high power thyristors. The test stand is composed of a set of 6 high power flash lamps, spectral filters and high speed infrared camera. The measurements consisted in recording a sequence of thermograms during the excitation of the tested object with an optical impulse derived from six flash lamps. The differences between the maximum temperature contrast on the surface of the tested component and various times of its occurrence for various defects (Fig. 6) are inconvenient in diagnostic process. While determining the location and area of the thermal heterogeneities in such structures as the tested components, it is of minor importance to determine thermal and geometrical properties of the defect precisely. The proposed method (Fig. 7) helps to generate an image depicting adjustment of contrast changing curve in time to the assumed reference function. Use of the linear correlation function to generate correlation images helps to increase the detectability of heterogeneous of thermal properties (Fig. 12).

Keywords: pulse thermography, correlation, layered structure, contrast images, images processing.

1. Wstęp

Termografia impulsowa jest metodą pozwalającą na diagnostykę jakości wykonania warstwowych elementów półprzewodnikowych. Powierzchnia badanego elementu absorbująca energię promieniowania impulsu pobudzenia jest źródłem zmiennego w czasie strumienia ciepłego przemieszczającego się w głąb obiektu [1, 2]. Takie przekazywanie energii można opisywać korzystając z pojęcia tzw. fali cieplnej. Niejednorodności cieplne występujące w strukturze są przyczyną zjawisk przypominających

efekty związane z przejściem silnie tłumionej fali przez granicę ośrodków. Można zastosować również jako model układ elektryczny zasilany impulsem ze źródła prądowego. Kolejne warstwy struktury modelowane są wtedy kolejnymi czwórnikami T lub II [3]. Różnice temperatur występujące w strukturze odpowiadają wtedy napięciom występującym na poszczególnych elementach modelu a strumień ciepła odpowiada natężeniu prądu.

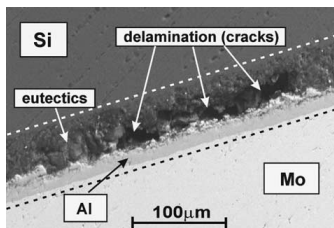
Temperatura na powierzchni badanego obiektu zależy m.in. od impedancji termicznej pobudzanego obszaru a ta zależy od parametrów cieplnych poszczególnych warstw struktury [4]. Termograficzna rejestracja sekwencji zmian temperatury poszczególnych punktów powierzchni pozwala na wygenerowanie sekwencji tzw. obrazów kontrastowych obrazujących wyłącznie zmiany temperatury spowodowane lokalnymi zmianami właściwości cieplnych. Uzyskane w ten sposób obrazy odpowiadają rozkładowi niejednorodności cieplnych wewnątrz struktury [2]. Ze względu na niewielkie wartości uzyskiwanych kontrastów oraz występujące różne zjawiska zmniejszające czytelność termogramów poszukuje się metod przetwarzania pozwalających na poprawę jakości uzyskanych obrazów przez co na zwiększenie wykrywalności niejednorodności związanych z defektami struktury [5, 6]. W niniejszym opracowaniu przedstawiono metodę zastosowaną podczas badania struktur półprzewodnikowych. Pokazano wyniki wykorzystania funkcji korelacji w celu utworzenia obrazu korelacyjnego z sekwencji obrazów kontrastowych.

2. Obiekt badań

Badanym obiektem jest struktura złożona z trzech warstw: warstwy krzemu o grubości 0,4 mm, warstwy przejściowej oraz molibdenowego podłoża o grubości 1,5 mm (rys. 1) [7]. Warstwa przejściowa jest eutektyką krzemu i aluminium i jej właściwości mogą ulegać radykalnym zmianom w obrębie jednej struktury. Wynika to zarówno ze zmian składu eutektyki jak i jej struktury krystalograficznej. Właściwości cieplne warstwy eutektyki zmieniają się w zakresie wartości charakterystycznych dla krzemu czy aluminium aż do właściwości zbliżonych do właściwości cieplnych izolatorów ciepła [8]. Pogorszenie właściwości cieplnych obszaru termokompresji ma charakter lokalny. Większość obszaru spoiny jest jednorodna i cechuje się wysokim przewodnictwem cieplnym. Takie obszary przyjęto za referencyjne i względem nich wyznaczono kontrast temperaturowy obszarów o zaburzonych właściwościach cieplnych.

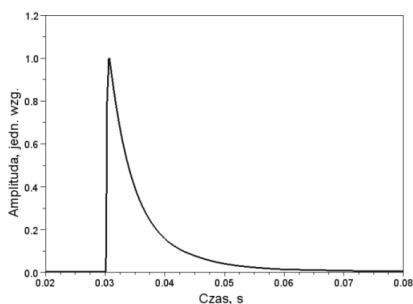
Korzystając z modelu czwórnikowego [3] wyznaczono impedancje termiczne w funkcji częstotliwości dla obszaru referencyjnego i obszaru z warstwą eutektyki o efuzyjności i dyfuzyjności cieplnej odpowiadających rozwarstwieniu. Zakładając kształt impulsu pobudzenia zgodny z wyznaczoną obwiednią mocy promieniowania błysku ksenonowej lampy wyładowczej (rys. 2) obliczono odpowiedź temperaturową dla obszaru referencyjnego i obszaru o zmienionych parametrach cieplnych. Wyznaczono

również kontrast bezwzględny obu odpowiedzi (rys. 3). Kształt przebiegu z rys. 3b jest zależny od grubości i cech materiału poszczególnych warstw struktury a więc również charakteryzuje występowanie na danej głębokości niejednorodności cieplnej związanej z wadą struktury.



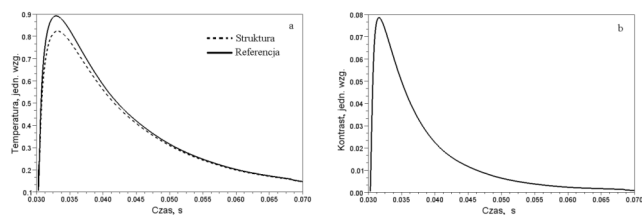
Rys. 1. Przekrój przez rzeczywistą strukturę [7]

Fig. 1. Cross section of the real structure [7]



Rys. 2. Znormalizowany kształt impulsu mocy lamp zastosowanych w badaniach

Fig. 2. The normalized shape of power pulse from lamps used in research



Rys. 3. Obliczona odpowiedź temperaturowa badanej struktury (a) oraz kontrast

Fig. 3. Thermal response of the structure and reference object (a) and the absolute contrast of those responses (b) computed basing on the model

3. Stanowisko badawcze

Pomiary wykonano na oryginalnym stanowisku zbudowanym na Politechnice Koszalińskiej we współpracy ze Szkołą Główną Służby Pożarniczej w Warszawie w ramach grantu nr NN515247037. Składa się ono z szybkiej kamery termowizyjnej Radiance HSX firmy Raytheon, zespołu 6 lamp błyskowych dużej mocy (1200 W·s), filtrów spektralnych, sterownika lamp, oraz zestawu statywów i uchwytów. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4.

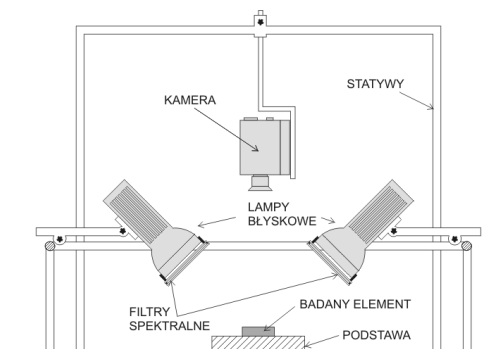
Zastosowana w badaniach kamera jest kamerą radiometryczną z chłodzonym matrycowym detektorem InSb. Pomiary wykonywano w trybie rozdzielczości detektora 128x128 pikseli przy częstotliwości ramki 480 Hz. Badane struktury mają średnicę 55 mm w efekcie rozmiar piksela obrazu równy jest ok. 400 μm. Poszukiwane defekty mają rozmiary od kilku do kilkunastu milimetrów.

Do przetwarzania sekwencji termogramów zastosowano opracowany na Politechnice Koszalińskiej program Termix.

Lampy generujące impuls pobudzenia są typowymi studyjnymi lampami fotograficznymi o energii błysku ok. 1200 J. Sterownik lamp, wykonany specjalnie do tego stanowiska, pozwala na uru-

chamianie poszczególnych lamp w dowolnych zaprogramowanych sekwencjach z dokładnością do 0,1 ms.

Termiczne stałe czasowe struktur półprzewodnikowych mają na tyle małe wartości, że rejestracja wyłącznie procesu stygnięcia (po impulsie pobudzenia) nie pozwoliłaby na prawidłową diagnostykę. Rejestracja temperatury w czasie pobudzenia nie jest możliwa, gdy w widmie promieniowania pobudzającego znajduje się również podczerwień. Powoduje to oślepienie detektora kamery, szczególnie w przypadku badania powierzchni o niskim współczynniku emisyjności. Z tego względu zastosowano filtry eliminujące podczerwień z promieniowania docierającego do badanego obiektu. Temperatura barwowa światła zastosowanych lamp równa jest 5500K, a więc maksimum widma występuje dla fali o długości 530 nm. Dzięki temu, pomimo ograniczenia widma do zakresu światła widzialnego, zestaw lamp z filtrami emituje wystarczająco energii aby pobudzić termicznie badany obiekt. Wyeliminowano w ten sposób również dodatkowe tło w podczerwieni powstające na skutek nagrzewania się elementów lamp absorbujących promieniowanie pobudzenia.



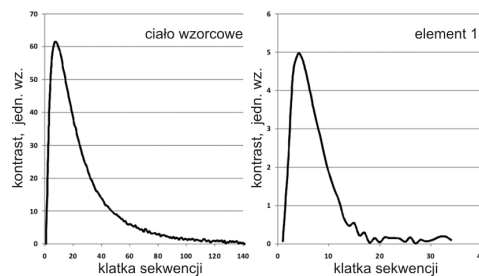
Rys. 4. Schemat budowy stanowiska badawczego

Fig. 4. Schematic diagram of the experimental stand

4. Pomiary

Pomiary polegały na rejestracji sekwencji termogramów w czasie pobudzenia badanego obiektu impulsem optycznym pochodzącym z sześciu lamp błyskowych. Badanie wstępne wykonano na elemencie wzorcowym w postaci aluminiowego krążka z frezowanymi wgłębieniami od strony przeciwnej do powierzchni pobudzanej. Po przetestowaniu metody wykonano pomiary na 10 opisanych wcześniej elementach półprzewodnikowych z wadami struktury określonymi innymi metodami diagnostycznymi.

Zarejestrowano po 900 klatek każdego pomiaru. Sekwencje termograficzne zostały następnie przetworzone na sekwencje obrazów kontrastowych. Przebieg kontrastu temperatury dla obszaru nad wybranym wgłębieniem elementu wzorcowego oraz dla obszaru występowania wady badanej struktury (element 1) pokazano na rys. 5.



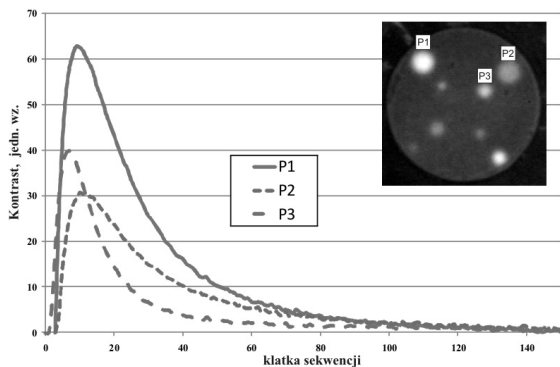
Rys. 5. Przebieg kontrastu temperatury dla obszaru nad wgłębieniem elementu

Fig. 5. Contrast changes in time for the area over cavity in the standard element and for the area of defect occurrence in the tested structure

5. Przetwarzanie obrazów termicznych

Zastosowanie procesu diagnostycznego w cyklu produkcyjnym wymaga określenia jednoznacznych kryteriów oceny oraz całkowitej automatyzacji. Przy określaniu położenia i powierzchni niejednorodności cieplnych, a więc ocenie przydatności elementu do zastosowania w dalszym procesie technologicznym, nie jest istotne precyzyjne określenie właściwości cieplnych i geometrycznych poszukiwanego defektu. Wiadomym jest w której warstwie struktury spodziewane jest jego wystąpienie.

Zastosowanie w tym celu termografii impulsowej wiąże się z pewnymi niedogodnościami, takimi jak występowanie nierównomierności związane z nierównomiernością oświetlenia impulsem pobudzenia, występowaniem nierównomierności absorpcji promieniowania pobudzenia związane z niedoskonałością pobudzanej powierzchni (różne wartości współczynnika absorpcji promieniowania), nierównomiernym rozkładem właściwości cieplnych w obrębie jednego defektu struktury. Niedogodności te powodują występowanie różnic maksymalnego kontrastu temperatury na powierzchni badanego elementu oraz różne momenty jego występowania dla różnych defektów (rys. 6).



Rys. 6. Przebieg kontrastu temperatury w różnych punktach ciała wzorcowego
Fig. 6. Contrast changes in time for various points on the standard element surface

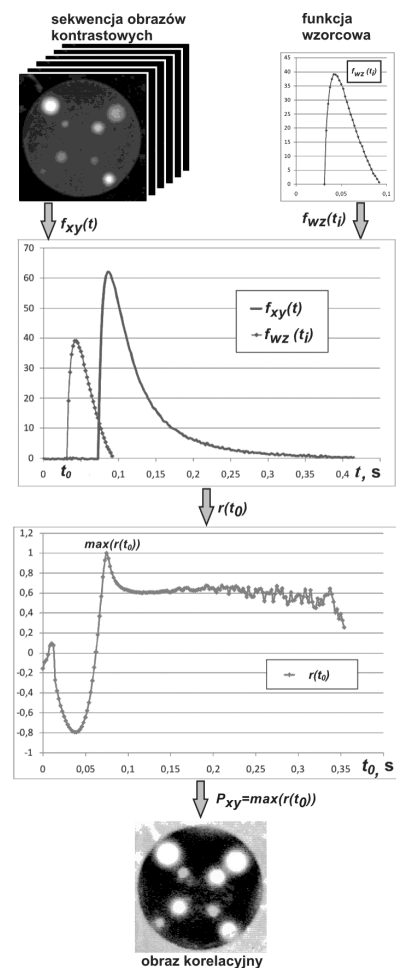
Charakterystyczny kształt krzywej zmian kontrastu w czasie pozwala jednak na przetworzenie sekwencji termogramów w obraz przedstawiający dopasowanie tej krzywej do zadanej funkcji wzorcowej. Schemat takiego procesu przedstawiono na rys. 7.

Przetwarzanie polega na wyznaczaniu współczynnika korelacji Pearsona dla kolejnych punktów (x,y) sekwencji obrazów kontrastowych pomiędzy kolejnymi fragmentami funkcji kontrastu w dziedzinie czasu $f_{xy}(t)$ a funkcją wzorcową $f_{wz}(t_i)$. Następnie wyznaczana jest maksymalna wartość funkcji $r(t_0)$ będącej zależnością współczynnika korelacji od momentu t_0 pierwszego punktu badanego fragmentu przebiegu. Wartość ta jest wartością punktu P_{xy} obrazu wynikowego. Po zastosowaniu procedury do wszystkich punktów sekwencji kontrastowej uzyskujemy obraz korelacyjny.

Opisaną procedurę zastosowano do przetworzenia sekwencji kontrastowej obiektu wzorcowego. Funkcję wzorcową $f_{wz}(t_i)$ dla tego obiektu ustalono na podstawie zmian w czasie kontrastu uśrednionego dla punktów z obszaru nad jednym z wgłębień. Można ją również wyznaczyć z modelu termofalowego o ile znane są parametry cieplne obiektu. Jeden z obrazów sekwencji oraz wynikowy obraz korelacyjny przedstawiono na rys. 8. Uzyskano wyraźną poprawę równomierności rozkładu wartości w punktach obrazu powierzchni nad wgłębieniami oraz zobrazowanie wszystkich wgłębień na jednym obrazie. Na rys. 9 pokazano trójwymiarowy profil kontrastu temperatury powierzchni nad wybranym wgłębieniem. Ten sam obszar po zastosowaniu opisanej procedury przedstawia rys. 10. Uzyskany obraz korelacyjny pozwala na dokładniejsze określenie powierzchni wgłębienia, którego obraz

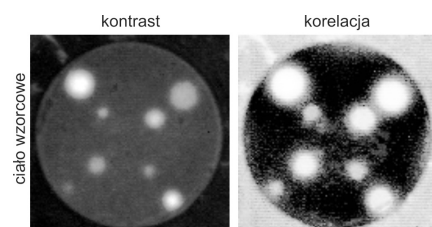
mikroskopowy pokazano na rys. 11. Obraz ten został wykonany dzięki uprzejmości pana Emiliena Leonhardta z Hirox Europe za pomocą mikroskopu Hirox KH-7700.

W sposób analogiczny wykonano pomiary dla struktur krzemolibden. Jako funkcję $f_{wz}(t_i)$, której korelację z przebiegiem kontrastu wyznacza się w celu utworzenia obrazu korelacyjnego, przyjęto przebieg kontrastu dla obszaru pod którym występowała charakterystyczna dla tych elementów niejednorodność. Porównanie obrazów kontrastowych z obrazami korelacyjnymi dla dwóch wybranych struktur przedstawiono na rys. 12. Znormalizowane profile wzdłuż linii przechodzącej przez obszar nad niejednorodnościami w obrazie kontrastowym i korelacyjnym pokazano na rys. 13. Podobnie jak w wypadku pomiarów wstępnych z wykorzystaniem wzorca uzyskano wyraźną poprawę równomierności rozkładu wartości oraz zobrazowanie defektów na jednym obrazie.



Rys. 7. Metoda przetwarzania sekwencji obrazów kontrastowych w obraz korelacyjny

Fig. 7. Method of converting contrast thermogram sequences into a correlation image

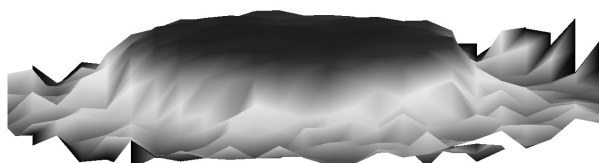


Rys. 8. Obraz kontrastowy i korelacyjny ciała wzorcowego
Fig. 8. Contrast and correlation image of the standard element



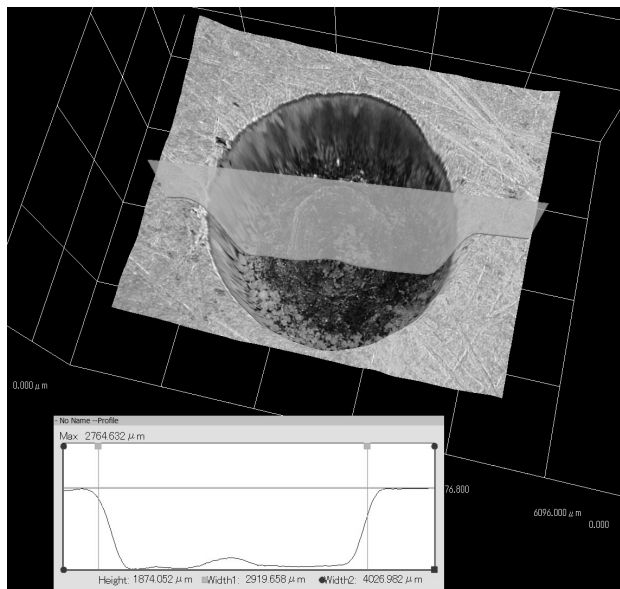
Rys. 9. Obraz kontrastowy jednego z obszarów nad wgłębieniem ciała wzorcowego w formie 3D

Fig. 9. Contrast image section of area over the cavity in the standard element in 3D form



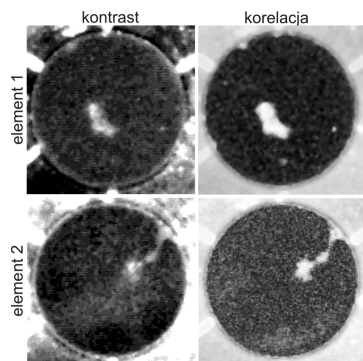
Rys. 10. Obraz korelacyjny jednego z obszarów nad wgłębieniem ciała wzorcowego (z rys. 9) w formie 3D

Fig. 10. Correlation image section of area over the cavity in the standard element (of Fig. 9) in 3D form



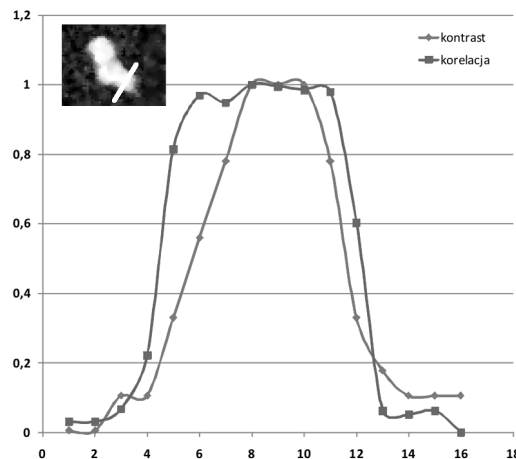
Rys. 11. Obraz mikroskopowy jednego z wgłębień ciała wzorcowego od strony tylnej

Fig. 11. The microscope image of cavity in the standard element (rear surface)



Rys. 12. Obrazy kontrastowe i korelacyjne wybranych elementów

Fig. 12. The contrast and correlation images of selected elements



Rys. 13. Porównanie profili wzdłuż linii przechodzącej przez obszar nad defektem w znormalizowanym obrazie kontrastowym i korelacyjnym

Fig. 13. Comparison of profiles of the normalised contrast and correlation coefficient values along the section going through the area over the heterogeneity

6. Wnioski

Termografia impulsowa w połączeniu z opisaną metodą przetwarzania sekwencji termogramów pozwala na zobrazowanie defektów występujących w strukturach półprzewodnikowych stosowanych do produkcji tyrystorów dużej mocy. Wykorzystanie funkcji korelacji do tworzenia obrazów korelacyjnych pozwala na zwiększenie wykrywalności wad struktury. Dzięki zastosowanej procedurze uzyskano znaczną poprawę kontrastu pomiędzy obszarem niejednorodności i referencyjnym oraz jednocześnie zobrazowanie wszystkich niejednorodności. Określenie wartości współczynnika korelacji jako wartości progowej pozwala na zautomatyzowanie procesu identyfikacji oraz określania pola powierzchni niejednorodności cieplnej.

7. Literatura

- [1] Maldague X., Galmiche F., Ziadi A.: Advances in pulsed phase thermography, Infrared Physics & Technology 43, Elsevier, 2002.
- [2] Maldague X., Moore P.: Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing, American Society for Nondestructive Testing, 2001.
- [3] Suszyński Z.: Termofalowe metody badania materiałów i przyrządów elektronicznych, Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2001.
- [4] De Mey G.: The use of thermal impedances for characterisation of electronic devices, VIII Krajowa Konferencja Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń-Jaszowiec 2009.
- [5] Zöcke C., Langmeier A., Stöbel R., Arnold W.: Reconstruction of the defect shape from lock-in thermography phase images, QIRT Journal vol.6, Lavoisier, 2009.
- [6] Klein M., Bendada A., Pilla M., Ibarra-Castanedo C., Maldague X.: Enhancing Infrared Images Contrast for Pulsed Thermography, 9th International Conference QIRT, Krakow 2008.
- [7] Suszyński Z., Duer R.: Photoacoustic inspection of thermal properties of layered structure with pulse excitations, Microelectronics Reliability 45 (2005).
- [8] Arsoba R., Suszyński Z.: Application of Photoacoustic Method and Evolutionary Algorithm for Determination of Thermal Properties of Layered Structure, Journal de Physique IV - Proceedings, Vol. 117, October 2004.