

Zbigniew SUSZYŃSKI, Mateusz KOSIKOWSKI
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I INFORMATYKI
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

Szybka wizualizacja jakości adhezji w strukturach warstwowych metodą modulacji przestrzennej

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 inż. Mateusz KOSIKOWSKI

Studia II st. na kierunku informatyka ukończył w trybie indywidualnym na Politechnice Koszalińskiej w 2007r. uzyskując tytuł Primus Inter Pares Expert Informatyk. Od 2007 ma otwarty przewód doktorski w dyscyplinie elektronika, pt. „Szybka metoda wizualizacji niejednorodności cieplnych oparta o rejestrację, przetwarzanie i rozpoznawanie obrazów termofalowych”. Aktywność naukowa związana jest z termografią aktywną i modelowaniem procesów cieplnych w ciałach stałych.



e-mail: mateusz.kosikowski@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano i opisano koncepcję stanowiska do szybkiej wizualizacji jakości adhezji struktur warstwowych krzem-molibden, wykorzystywanych do produkcji diod i tyrystorów mocy, metodą termofalową w trybie modulacji przestrzennej. Opisano sposób akwizycji obrazów termofalowych oraz parametry pomiaru, w tym parametry sygnału pobudzenia. W artykule zamieszczono przykłady obrazów termofalowych ośmiu przebadanych struktur. Wybrana struktura została porównana z obrazami zarejestrowanymi metodą mikrofonową.

Słowa kluczowe: modulacja przestrzenna, wizualizacja, defekty, adhezja, metod termofalowe, termografia aktywna.

Fast visualization of adhesion quality in layered structures with the help of beam displacement modulation method

Abstract

The paper presents an idea of the measurement setup for fast visualization of adhesion quality in silicon-molybdenum structures with the help of beam displacement modulation technique. The prototype experimental set-up uses the spatial modulation technique and constant excitation power (high power continuous-wave laser) for exciting the time-changing temperature field on the object surface. This solution consists in placing the examined objects on a disc rotating with a constant angular velocity. The infrared detector is situated so as to record temperature changes with a certain delay after the excitation. The objects under investigation were silicon-molybdenum structures used for manufacturing diodes and high power thyristors. Additionally, the paper describes an idea of acquisition of thermal-wave images as well as the measurement parameters, including parameters of excitation. The thermal-wave images of the eight examined structures are shown. The image of one structure is compared with images acquired by the well-known photo-acoustic method.

Keywords: displacement modulation, visualization, defects, adhesion, thermal-wave methods, active thermography.

1. Wstęp

Potrzeba detekcji niejednorodności cieplnych, w materiałach i przyrządach stosowanych m.in. w elektronice, skłania do opracowywania nowych metod ich wykrywania, wizualizacji i parametryzacji. Zagadnienia te są szczególnie istotne z punktu widzenia możliwości pomiaru parametrów cieplnych w strukturach warstwowych, jak również w badaniach jakości adhezji. Do najbardziej znanych metod analizy właściwości cieplnych należą metody fototermiczne, do których należy m.in. metoda fotoakustyczna [1-3]. Jest to metoda polegająca na wzbudzeniu strumienia ciepłego z wykorzystaniem energii promieniowania optycznego i rejestracji temperatury w komorze fotoakustycznej lub przetwornikiem piezoelektrycznym. Metoda ta charakteryzuje się bardzo dużą czułością ale jest kłopotliwa ze względu na konieczność

umieszczenia obiektu w hermetycznej komorze lub wymaga zapewnienia kontaktu akustycznego pomiędzy obiektem i przetwornikiem. Pomimo tych trudności oraz zniekształceń liniowych związanych z pośrednim charakterem pomiaru temperatury jest to, ze względu na sposób pomiaru temperatury bardzo wrażliwa metoda detekcji niejednorodności cieplnych. Istotną wadą tej metody, oprócz już wspomnianych, jest jej mała wydajność, ponieważ pomiar odbywa się punkt po punkcie.

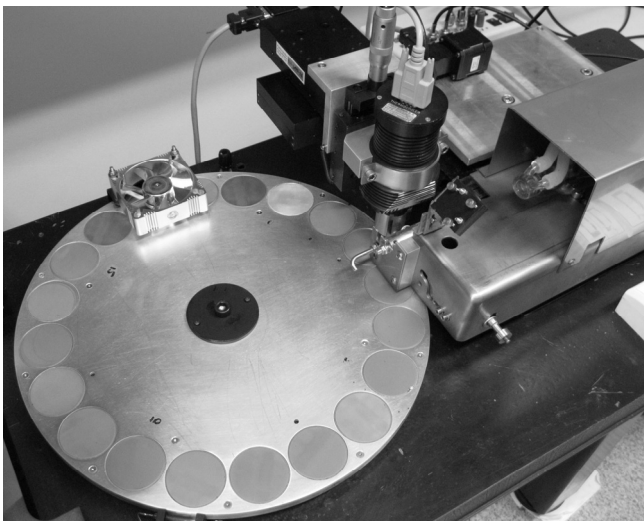
Do metod fototermicznych należy również termografia aktywna. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych jest termografia podczerwieni z pobudzeniem impulsowym (pulsed thermography) [4]. Istotnym problemem tej techniki jest trudność równomiernego pobudzenia obiektu na całej powierzchni dużą gęstością mocy optycznej. Wadą termografii impulsowej jest również ograniczona możliwość wpływania na widmo częstotliwościowe pobudzenia oraz bardzo ograniczona prędkość rejestracji poszczególnych kadrów. Jej istotną zaletą jest szybkość akwizycji danych i możliwość ich natychmiastowego przetwarzania.

Od dawna znana jest również metoda fototermiczna w trybie pobudzenia przestrzennego (ang.: beam displacement modulation - BDM)[5-6]. Polega ona na pobudzaniu obiektu stałą co do wartości energią skupionego promieniowania optycznego przemieszczającego się względem obiektu. Największą wydajność detekcji niejednorodności cieplnych można uzyskać przy pobudzeniu i detekcji w szerokim zakresie widma częstotliwościowego. Informację o właściwościach cieplnych obiektu uzyskuje się poprzez obserwację odpowiedzi temperaturowej w obszarze pobudzenia lub jego pobliżu. Technika modulacji przestrzennej stosowana była w fotoakustyce od dawna [5], ale ze względu na trudności analityczne i techniczne, nie znalazła szerokiego zastosowania. Jedną z odmian tej metody, w której obiekt badany umieszczony jest w określonej pozycji, a przemieszczenie miejsca pobudzenia i rejestracji odbywa się ze pomocą odpowiednich zwierciadeł, wykorzystano m.in. do badania jakości powłok ochronnych myśliwców serii F [7-8]. Wadą tego rozwiązania, które nazwano „flying-spot camera”, jest to, że wraz ze zmianą kąta luster modulujących, zmienia się odległość pomiędzy pobudzeniem i rejestracją, co może prowadzić do błędnej interpretacji danych pomiarowych. Istnieje również rozwiązanie metody modulacji przestrzennej, które polega na przemieszczaniu obiektu względem nieruchomego źródła pobudzenia i detektora IR. Istota tej metody została zaprezentowana w postaci dwuwymiarowego modelu TLM (transmission line matrix) [9] wykorzystującego analogię pomiędzy równaniami przepływu ciepła w ciałach stałych i propagacją fali elektromagnetycznej w stratnej linii długiej [10,11]. Model ten odwzorowuje istotę pobudzenia BDM i rejestracji punktowej temperatury ale jest bardzo kosztowny obliczeniowo. Sygnał temperaturowy w prezentowanej formie jest funkcją parametrów cieplnych struktury, rozkładu przestrzennego gęstości pobudzenia, szybkości przemieszczania się obszaru pobudzenia

i rejestracji względem obiektu oraz przesunięcia detektora względem pobudzenia.

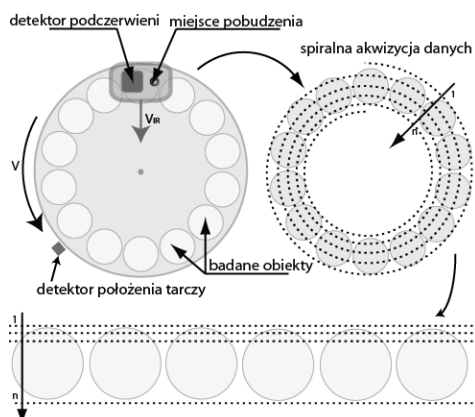
2. Metodyka pomiaru

Zaprojektowane i wykonane przez autorów prototypowe stanowisko pomiarowe (rys.1), wykorzystuje technikę modulacji przestrzennej do wzbudzenia zmiennego w czasie pola temperaturowego na powierzchni obiektu. Rozwiązanie techniczne polega na umieszczeniu badanych obiektów na tarczy obracającej się ze stałą prędkością kątową [12]. Punktowy detektor podczerwieni oraz źródło pobudzenia, którymi są odpowiednio VIGO PVI-2TE-5 oraz laser gazowy CO₂ 50W CW, umieszczone są nad tarczą i w czasie pomiaru przemieszczają się w kierunku jej środka. Detektor podczerwieni usytuowany jest w taki sposób, że z pewnym opóźnieniem w czasie rejestruje zmiany temperatury na powierzchni obiektu powstałe w wyniku grzania.

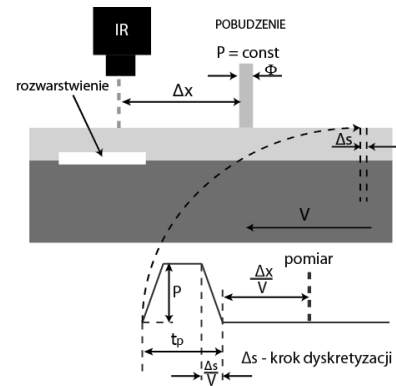


Rys. 1. Stanowisko pomiarowe
Fig. 1. The experimental set-up

Ze względu na ruch obrotowy tarczy z obiektami oraz liniowe przemieszczanie się pobudzenia wraz z detektorem ku środkowi tarczy skanowanie powierzchni próbki odbywa się w sposób spiralny (rys. 2). Czas pomiaru wszystkich obiektów zależy od prędkości obrotowej tarczy oraz szybkości przemieszczenia suportu z laserem i detektorem. Zarejestrowany sygnał przetwarzany jest następnie do postaci obrazu, który powstaje z podziału zarejestrowanego ciągu wartości na kolejne wiersze.



Rys. 2. Sposób akwizycji danych
Fig. 2. Scheme of data acquisition



Rys. 3. Parametry pomiaru
Fig. 3. Measurement properties

Parametrami pomiaru są prędkość obrotowa tarczy V , odległością pomiędzy miejscem rejestracji i miejscem pobudzenia Δx oraz szerokość obszaru pobudzenia Φ (rys. 3). Szerokość obszaru pobudzenia oraz prędkość przemieszczania obiektu wpływają bezpośrednio na czas trwania pobudzenia (1) każdego dyskretnego fragmentu powierzchni Δs .

$$t_p = \frac{\Phi + 2 \cdot \Delta s}{V} \Big|_{\Delta s \rightarrow 0} = \frac{\Phi}{V} \quad (1)$$

Co prawda strumień energii dostarczanej do powierzchni obiektów jest stały co do wartości i ciągle w czasie, ale z punktu widzenia pojedynczego fragmentu obiektu pobudzenie przyjmuje charakter impulsowy. Przyjęto, że rozkład gęstości mocy, w obrębie pobudzenia, jest jednorodny, co jest równoznaczne z tym, że impuls pobudzenia ma kształt trapezu. Dla nieskończenie małego obszaru dyskretnego kształt impulsu zbliża się do prostokąta o czasie trwania t_p . Zmiana prędkości obrotowej tarczy oraz wielkości obszaru pobudzenia umożliwiają modyfikację widma częstotliwościowego sygnału pobudzenia. Parametry te pozostają więc w związku z głębokością penetracji termicznej badanej struktury.

Ponieważ odpowiedź temperaturowa jest opóźniona względem pobudzenia to detekcja temperatury powinna mieć miejsce dokładnie w momencie, gdy fala temperaturowa odbije się od niejednorodności i powracając ku powierzchni wywrze największy wpływ na wartość temperatury. Opóźnienie momentu detekcji temperatury względem pobudzenia można kontrolować przez regulację przesunięcia Δx . Parametr ten wraz z prędkością V , wyznaczają czas pomiędzy końcem pobudzenia a momentem rejestracji (rys. 3). Przyjmuje się, że rejestracja temperatury ma charakter lokalny. Odpowiednie dobrane wartości omówionych parametrów do właściwości cieplnych obiektów umożliwi obserwację niejednorodności cieplnych umieszczonych na różnych głębokościach. Głębokość wnikania fali temperaturowej dla pobudzenia sygnałem o charakterze skokowej zmiany mocy można przybliżyć następującym wyrażeniem [13]:

$$l_{penetr}(t) \approx \sqrt{4 \cdot \alpha \cdot t} \quad (2)$$

gdzie: α - dyfuzyjność cieplna materiału, t - czas od początku pobudzenia.

Ponieważ fala temperaturowa wracając na powierzchnię pokonuje dwukrotnie większą drogę, to czas (od początku pobudzenia), po którym powinna nastąpić rejestracja temperatury, można oszacować z wyrażenia:

$$\Delta t \geq \frac{l^2}{\alpha} \quad (3)$$

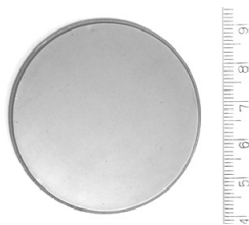
Dla struktury z krzemem o grubości $l=0.4$ mm oraz dyfuzyjności $\alpha=6,33 \cdot 10^{-5}$ m²/s to opóźnienie wynosi ok. 2,5 ms. Przy średnicy pobudzenia ok. 1mm i prędkości liniowej obiektów względem pobudzenia ok. 1m/s oznacza to, że obszar detekcji temperatury

powinien być przesunięty względem końca obszaru pobudzenia o ok. $\Delta x = 1,5$ mm.

Przed przystąpieniem do eksperymentu, przeprowadzono optymalizację wartości omówionych parametrów w celu maksymalizacji bezwzględnego kontrastu temperaturowego niejednorodności względem obszarów o dobrej adhezji. Przyjęto stałą szerokość obszaru pobudzenia $\Phi = 1$ mm, a prędkość obrotowa tarczy zmieniała się w zakresie 0,5-2 obr/s. Proces optymalizacji prędkości obrotowej tarczy oraz opóźnienia pomiędzy pobudzeniem i rejestracją do maksymalizacji kontrastu temperaturowego niejednorodności w strukturach krzemu połączonych z molibdenem został szczegółowo opisany w [14].

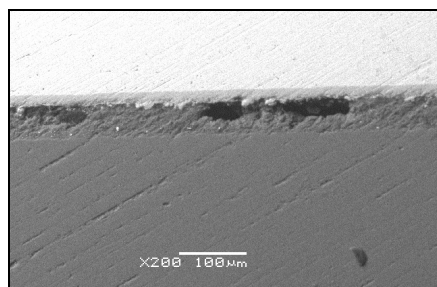
3. Obiekty badań

Obiektami badań były struktury tyrystorowe krzem-molibdenem o średnicy ok. 55 mm, wykonane w warunkach przemysłowych metodą spajania termo-kompresyjnego (rys. 5). Jako spoiwo do łączenia krzemu i molibdenu wykorzystano cienką folię aluminiową o grubości rzędu 10 μm . Grubości warstw krzemu i molibdenu wynoszą odpowiednio około 400 μm i 1500 μm . Dla wybranych obiektów folia aluminiowa zawierała specjalnie wykonane otwory o średnicy 3 mm lub 8 mm. Otwór w folii miał zwiększyć prawdopodobieństwo powstania defektów w formie rozwarstwień. Przykładowe zdjęcie przekroju tyrystora przedstawia rys. 6. Obraz ten został zarejestrowany przez skaningowy mikroskop elektronowy i przedstawia zmiany strukturalne w obszarze wadliwego połączenia.



Rys. 5. Struktura krzemu spojonego z molibdenem wykorzystywana do produkcji tyrystorów mocy

Fig. 5. Silicon-molybdenum structures used for manufacturing high power thyristors



Rys. 6. Rozwarstwienie w strukturze tyrystora mocy

Fig. 6. Delamination in a high power thyristor structure

W typowych obiektach defekty takie powstają najprawdopodobniej z powodu nierównomierności procesów topienia i krystalizacji eutektyki w czasie grzania i stygnięcia struktury w procesie termokompresji. Na łączone ze sobą powierzchnie warstw krzemu i molibdenu napłyła się niekiedy aluminium. Zabieg taki ma poprawić jakość połączenia. W czasie eksperymentu przebadano struktury, których folia Al była jednorodna, bądź zawierała otwory. W niektórych obiektach powierzchnie łączonych warstw krzemu lub molibdenu zostały pokryte metalizacją. Badane obiekty podzielone zostały na 4 grupy (tab. 1), w zależności o metalizowanej warstwy. W grupie I znalazły się obiekty, których obie łączone warstwy zostały pokryte metalizacją. Grupa II i III zawierała struktury, w których metalizacją pokryta została odpowiednio tylko warstwa molibdenu

lub krzemu. Do ostatniej grupy przypisano obiekty, których warstwy nie zostały pokryte metalizacją.

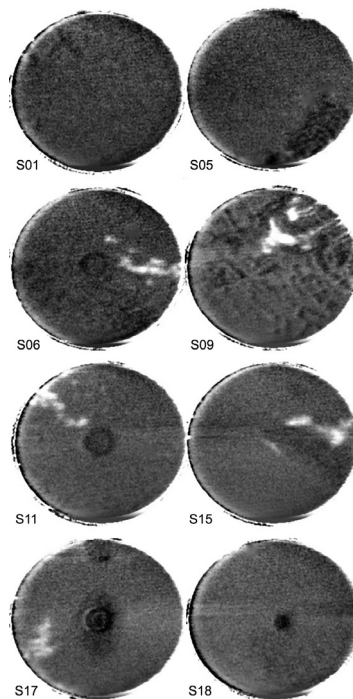
Tab. 1. Wykaz badanych struktur

Tab. 1. List of objects under investigation

Grupa	Oznaczenie struktury	Warstwa metalizowana	Średnica otworu w folii Al
I	S01	Si, Mo	8 mm
	S05	Si, Mo	-
II	S06	Mo	8 mm
	S09	Mo	-
III	S11	Si	8 mm
	S15	Si	-
IV	S17	-	3 mm
	S18	-	-

4. Wyniki pomiarów

Termogramy badanych struktur (rys. 7) zostały wykonane z rozdzielczością równą 240 wierszy. Całkowity czas pomiaru wszystkich struktur wyniósł 4 minuty. Ponieważ na tarczy umieszczono 20 struktur, to czas pomiaru jednej struktury, wyniósł zaledwie 12 sekund. Czas ten może zostać skrócony przez zastosowanie szerszego obszaru pobudzenia oraz odpowiednio większej prędkości obrotowej tarczy i opóźnienia Δx .



Rys. 7. Obrazy termofalowe badanych struktur

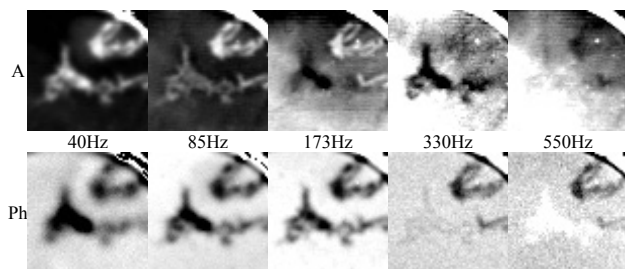
Fig. 7. Thermal-wave images of the objects examined

Obrazy przedstawione na rys. 7 zostały poddane przetwarzaniu w celu usunięcia m.in. składowej wolnozmienną temperatury, spowodowanej wzrostem średniej temperatury struktur przy każdym kolejnym pełnym obrocie tarczy. Szczegółowe informacje o metodach przetwarzania obrazów BDM będą przedstawione w odrębnej publikacji.

Na podstawie zarejestrowanych obrazów termofalowych można wnioskować o występowaniu i usytuowaniu niejednorodności cieplnych na granicy krzem-molibden w badanych strukturach. W trzech z ośmiu struktur (S01, S05, S18) nie stwierdzono defektów w obszarze połączenia krzemu z molibdenem. W przypadku

obiektów S05 i S18 może być to dość oczywiste, gdyż struktury te były wykonane w optymalnych warunkach produkcyjnych. Brak wystąpienia defektu w strukturze S01 może wynikać z faktu, pokrycia metalizacją obu łączonych warstw. Wszystkie struktury z grupy II i III posiadały defekty, nawet w przypadku, gdy folia Al nie posiadała otworów.

W strukturach, których folia posiadała otwór, nie stwierdzono jednoznacznego związku powstania niejednorodności i korelacji jej kształtu z otworem w folii. Może to być spowodowane tym, że w procesie łączenia warstw, w temperaturze powyżej 700°C aluminium przechodzi w stan płynny, dzięki czemu może wypełnić przestrzenie pomiędzy łączonymi warstwami. Sytuacja taka mogła mieć miejsce w przypadku struktury S01. W przypadku struktury S09, oprócz defektu występującego w prawym górnym obszarze, widoczne jest zróżnicowanie właściwości cieplnych w obszarze całego obiektu. Zróżnicowania te najprawdopodobniej wizualizują niejednorodną grubość powstałej eutektyki i nie mają charakteru rozwarstwienia. Obszar defektu struktury S09 został przebadany dodatkowo metodą fotoakustyczną (rys. 8). Zarejestrowano obrazy amplitudowe i fazowe dla częstotliwości pobudzenia od 40 do 550 Hz. Porównanie obrazów amplitudowych i fazowych z obrazem struktury S09 pozwala zaobserwować, że w obu przypadkach niejednorodności cieplne mają podobny kształt i umiejscowienie. Na podstawie analizy częstotliwościowej kontrastu niejednorodności [10, 11] z rys. 8, można z całą pewnością stwierdzić że są to niejednorodności charakteryzujące się zmniejszoną efuzyjnością i dyfuzyjnością cieplną i są one położone na głębokości ok. 200-400 μm od powierzchni, a więc w obszarze eutektyki krzemu i aluminium.



Rys. 8. Obrazy amplitudowe (A) i fazowe (Ph) defektu struktury S09 wykonane metodą fotoakustyczną

Fig. 8. Amplitude (A) and phase (Ph) images of S09 structure acquired by the photoacoustic method

W analizowanym obszarze można zauważyć dwie niejednorodności (jedna znajduje się bliżej krawędzi obiektu a druga bliżej środka struktury), których kontrasty amplitudowe i fazowe w funkcji częstotliwości trochę się różnią (rys. 8), co świadczy o tym, że niejednorodności te znajdują się na różnych głębokościach. Analiza ilościowa nie jest jednak przedmiotem tej publikacji i dlatego ten wątek nie jest tu analizowany.

5. Wnioski

W strukturach krzem-molibden, które wykorzystywane są do produkcji diod i tyrystorów mocy, bardzo często dochodzi do powstania obszarów o słabej adhezji pomiędzy łączonymi warstwami. Defekty takie mogą wpływać na charakter pracy tych urządzeń, dlatego istotne jest ich rozpoznanie. Istnieje wiele metod badawczych pozwalających na wizualizację niejednorodności cieplnych lub pomiar właściwości cieplnych badanych obiektów. Są to m.in. metoda fotoakustyczna oraz ultradźwiękowa. Ze względu na konieczność umieszczenia próbki w specjalnej komorze oraz długi czas pomiaru, metody te sprawdzają się jedynie w warunkach laboratoryjnych i przystosowane są do badania pojedynczych obiektów. Metody termografii aktywnej, a w szczególności metoda modulacji przestrzennej pozwala na szybką i stosunkowo tanią wizualizację niejednorodności cieplnych. Zastosowanie jednopunktowego detektora do detekcji temperatury pozwala rejestrować obrazy z bardzo

wysoką rozdzielczością czasową i przestrzenną. Nie można tego osiągnąć w przypadku termowizji aktywnej wykorzystującej nawet szybkie kamery IR. W przypadku metody BDM źródłem pobudzenia jest laser o dużej mocy pracujący w trybie ciągłym, a rejestracja odbywa się w sposób skaningowy. Takie rozwiązanie techniczne pozwoliło rozwiązać problem konieczności pobudzenia obiektu strumieniem o dużej gęstości mocy, który dotyczy termografii impulsowej, gdzie pobudzenie i rejestracja kamerą IR odbywa się na całej powierzchni próbki. Metoda modulacji przestrzennej pozwala na wizualizację niejednorodności w badanych obiektach w czasie ok. 4 minut. Czas ten może zostać skrócony poprzez modyfikację parametrów pomiaru.

Kształty defektów zarejestrowane metodą fotoakustyczną oraz metodą modulacji przestrzennej wykazały całkowitą zbieżność. Defekty, których powstanie zostało wymuszone nieciągłością folii Al nie wykazują korelacji kształtu z otworem. W przypadku struktur, dla których jedna z łączonych warstw została pokryta metalizacją nie stwierdzono poprawy jakości adhezji w stosunku do struktur, których warstwy nie posiadały metalizacji.

Prace badawcze zostały sfinansowane ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu nr: NN515247037.

Struktury wykorzystane w eksperymencie zostały przygotowane i dostarczone przez firmę Lamina Semiconductor International z siedzibą w Piasecznie k. Warszawy.

6. Literatura

- [1] Ringemacher H.I.: Coordinate Modulation Photoacoustics With Piezoelectric Detection, IEEE Ultrasonic Symposium, 1982, pp. 576-579.
- [2] Quimby R.S.: Real-Time Photoacoustic Microscopy, Applied Physics Letters, Vol. 45, No. 10, November 1984, pp. 1037-1039.
- [3] Quimby R.S., Liu Z.M.: Theory of Real-Time Photoacoustic Microscopy, Canadian Journal of Physics, Vol. 64, 1986, pp. 1276-1280.
- [4] Genesta M., Martinez M., Mradb N., Renauda G. and Fahra A.: Thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs, Composite Structures, Volume 88, Issue 1, March 2009, Pages 112-120.
- [5] Quimby R.S.: Photoacoustic Microscopy With a New Modulation Technique, Applied Physics Letters, Vol. 39, No. 11, December 1981, pp. 880-882.
- [6] Suszyński Z., Arsoba R.: Thermal Wave Method of Multilayer Structures Diagnostic, Proceedings of the 28th International Conference IMAPS-Poland, Wrocław, 2004, pp. 108-118.
- [7] Wang Yiqian: Thermal Wave Imaging: Flying SPOT Camera, Thesis (PH.D.), Wayne State University, 1993.
- [8] Wang Y.Q., Chen P., Kuo P.K., Favro L.D., Thomas R.L.: Flying laser spot thermal wave IR imaging, Review of progress in quantitative nondestructive evaluation. Vol. 11A, Proceedings of the 18th Annual Review, Brunswick, ME, July 28-Aug. 2, 1991 (A93-18576 05-38), p. 453-456.
- [9] Suszyński Z., Arsoba R.: Modelling of Dynamic Temperature Response in Multilayer Structure for Beam Displacement Modulation, Journal de Physique IV - Proceedings, Vol. 117, October 2004, pp. 79-84.
- [10] Suszyński Z.: Termofalowe metody badania materiałów i przyrządów elektronicznych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2001.
- [11] Arsoba R.: Badanie jakości termokompresji w strukturach tyrystorowych metodami termofalowymi dla pobudzeń energetycznych zmierzonych w czasie lub przestrzeni. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin 2005.
- [12] Suszyński Z., Kosikowski M.: Stanowisko badawcze do szybkiej wizualizacji właściwości cieplnych struktur warstwowych w trybie modulacji przestrzennej, Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, Vol. 50, nr 10, SIGMA-NOT, pp. 99-101.
- [13] Tam A.C.: Applications of Photoacoustic Sensing Techniques, Reviews of Modern Physics, Vol. 58, No. 2, 1986, pp. 381-431.
- [14] Kosikowski M., Suszyński Z.: Optimization of recording of thermal-wave images, International Journal of Thermophysics, Volume 32, Number 4, 828-835.