

Zastosowanie wibrometru laserowego do badań dyfuzyjności cieplnej materiałów stosowanych w elektronice

Streszczenie. Nowoczesne wibrometry laserowe o niespotykanej dotąd rozdzielczości, wynoszącej nawet 20pm [1], mogą znaleźć zastosowanie w badaniach właściwości cieplnych materiałów stosowanych w elektronice. Artykuł prezentuje próbę wykorzystania takiego wibrometru do wyznaczania dyfuzyjności cieplnej materiałów takich jak krzem, german i krzemogerman.

Abstract. Modern laser vibrometer of unprecedented resolution of even 20pm [1] may be used in studies of thermal properties of materials used in electronics. This article presents an attempt to use of such vibrometer to determine thermal diffusivity of the materials such as silicon, germanium and silicon-germanium. (The use of laser vibrometer in research of thermal diffusivity of materials used in electronics).

Słowa kluczowe: fototermika, fotoakustyka, dyfuzyjność cieplna, interferometr Michelsona, wibrometr laserowy.

Keywords: photothermics, photoacoustics, thermal diffusivity, Michelson interferometer, laser vibrometer.

doi:10.12915/pe.2014.09.05

Wstęp

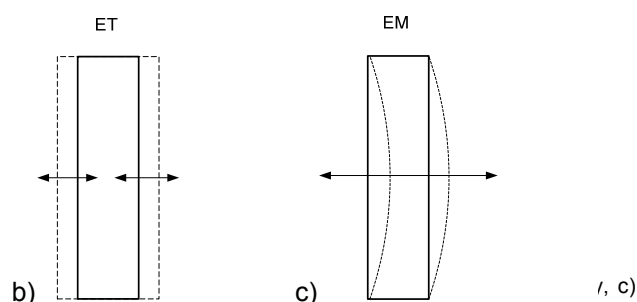
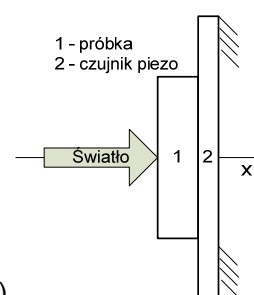
Badania właściwości cieplnych materiałów stosowanych w elektronice są istotnym zagadnieniem w konstruowaniu przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych. Szczególnie tam, gdzie mamy do czynienia z odprowadzaniem ciepła czy wytwarzaniem przyrządów składających się ze struktur wielowarstwowych, konieczny jest dobór materiałów o odpowiednich parametrach cieplnych. Dlatego ważny jest rozwój metod pozwalających na określanie tych parametrów na kolejnych etapach powstawania przyrządu, zaczynając od materiałów wyjściowych, a kończąc na produkcie finalnym. Istnieje wiele technik pomiarowych służących do wyznaczania parametrów cieplnych takich jak: przewodność cieplna κ , ciepło właściwe c , czy dyfuzyjność cieplna α . Opierają się one na rejestracji zmian pola temperaturowego (strumienia ciepła), stymulowanych generatorem ciepła. Do wzbudzenia pola temperaturowego stosuje się powszechnie źródła światła, a grupa metod pomiarowych wykorzystujących je zwana jest fototermiką. Ze względu na sposób detekcji pola temperaturowego wyróżnia się następujące techniki badawcze:

- bezpośredni pomiar temperatury badanego obiektu;
- detekcję promieniowania podczerwonego;
- pomiar zmian kąta odbicia wiązki sondującej, wywołanych zmianami gęstości próbki;
- deflekcyjną (technikę mirażu) – pomiar zmian ugięcia wiązki sondującej, wywołanych zmianami gęstości gazu otaczającego badany obiekt;
- fotoakustyczną – pomiar zmian ciśnienia gazu otaczającego badany obiekt;
- piezoelektryczną – pomiar deformacji badanego obiektu za pomocą czujnika piezoelektrycznego.

Ostatnia z wymienionych metod – metoda piezoelektryczna stała się inspiracją do podjęcia próby wykorzystania wibrometru laserowego w badaniach właściwości cieplnych materiałów.

Teoria

Teorię detekcji piezoelektrycznej przedstawiono w pracy W. Jacksona i N. Amara [2]. Dotyczy ona pobudzenia światłem, którego natężenie jest modulowane przebiegiem harmonicznym o częstotliwości niższej niż częstotliwość rezonansowa obiektu, tzn. kiedy naprężenia termoelelastyczne nie powodują powstawania fali akustycznej w próbce. Opis metody piezoelektrycznej można również znaleźć w pracach J. V. Blonskiego [3], czy też w pracach polskich autorów M. Malińskiego [4] i J. Zakrzewskiego [5].



W metodzie piezoelektrycznej wykorzystano zjawisko deformacji obiektu, wywołanej rozszerzalnością cieplną oraz gradientem temperatury. Czujnikiem piezoelektrycznym będącym w stałym kontakcie z badanym obiektem, często przyklejonym do niego, rejestruje się drgania wywołane generacją zmiennego strumienia ciepła (rys. 1a). Dwa efekty są obserwowane w trakcie pomiaru: efekt „tłokowy” (ET) i efekt „membranowy” (EM) (rys. 1b i c). Rozszerzalność cieplna powoduje, że obiekt zwiększa swoją objętość pod wpływem wzrostu jego temperatury. Jeżeli generujemy zmienne pole temperaturowe, to objętość obiektu „podąża” za zmianami temperatury, dając efekt przemieszczającego się tłoku. Gradient temperatury istniejący w obiekcie powoduje jego deformację. W wyniku generacji zmiennego pola temperaturowego obiekt drga. Sygnał piezoelektryczny dany jest następującym wzorem:

$$(1) \quad V = \frac{eL}{\epsilon S} 2\alpha_T \left(\langle T_0 \rangle - \frac{l}{2} \langle \tau \rangle \right)$$

$$(1a) \quad \langle T_0 \rangle = \frac{1}{l} \int_0^l T(x) dx$$

$$(1b) \quad \langle \tau \rangle = \frac{12}{l^3} \int_0^l \left(x - \frac{l}{2}\right) T(x) dx$$

gdzie: e – współczynnik przekształcenia elektro-mechanicznego, L – grubość przetwornika piezo, ε – stała dielektryczna, S – powierzchnia próbki, α_T – współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej, l – grubość próbki, $T(x)$ – rozkład temperatury wzdłuż próbki.

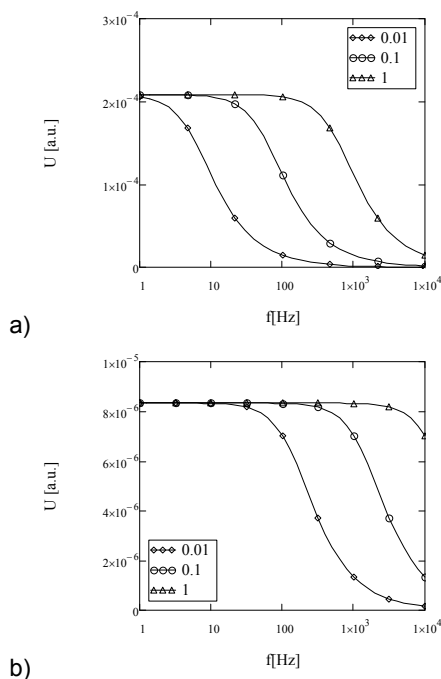
Składnik $\langle T_0 \rangle$ opisuje efekt tłokowy, a składnik $\langle \tau \rangle$ – efekt membranowy. W szczególnym przypadku, dla pobudzenia harmonicznego o częstotliwości f i przy założeniu, że grubość próbki jest dużo większa od głębokości wnikania światła, wzór na sygnał piezoelektryczny dany jest następująco:

$$(2) \quad V = -\frac{2P\alpha_T}{\kappa l \sigma^2} \left(1 + \frac{3(1 - \cosh(\sigma l))}{\sigma l \cdot \sinh(\sigma l)} \right)$$

$$(2b) \quad P = 2I_0 b^2 \frac{eL}{\varepsilon S}$$

gdzie: I_0 – natężenie światła wzbudzającego, b – szerokość połowkowa wiązki światła, $\sigma = (j2\pi f/\alpha)^{1/2}$, α – dyfuzyjność cieplna.

Widzimy, że wielkość sygnału piezoelektrycznego zależy od wielu czynników, dlatego w praktyce bada się raczej charakterystyki częstotliwościowe, a nie wartości absolutne uzyskanych sygnałów. Analiza charakterystyk częstotliwościowych umożliwia pozyskanie informacji o dyfuzyjności cieplnej. Przykładową rodzinę takich charakterystyk przedstawiono na rysunku 2.

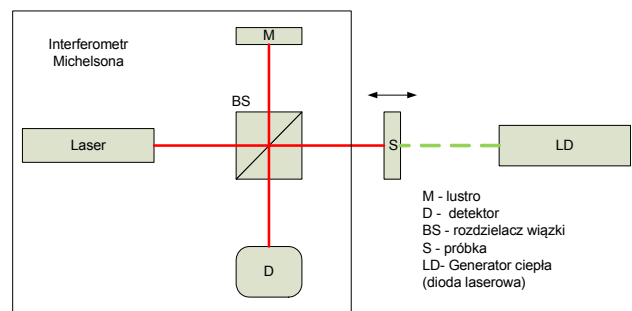


Rys.2. Rodzina charakterystyk częstotliwościowych sygnału piezoelektrycznego. Parametry wzięte do symulacji: dyfuzyjność cieplna $\alpha = 0,01; 0,1; 1 \text{ cm}^2/\text{s}$ i grubość próbki a) $l = 0,05 \text{ cm}$, b) $l = 0,01 \text{ cm}$

W zakresie częstotliwości od kilku Hz do kilku kHz obserwowalne są znaczące zmiany sygnału, umożliwiające badanie dyfuzyjności cieplnej materiałów. Niezbędny zakres częstotliwości pomiarowych zdeterminowany jest stosunkiem α do l^2 . Dla materiałów o lepszej dyfuzyjności

cieplnej punkt przegięcia charakterystyki przesuwają się w stronę większych częstotliwości, podobnie dzieje się dla próbek cieńszych. Jak pokazano na rysunku 2, w przypadku typowych grubości próbek rzędu kilkuset μm możliwe jest wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej dla takich materiałów jak: krzem $\alpha = 0,9-0,6 \text{ cm}^2/\text{s}$, german $\alpha = 0,6-0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$ itp. Wyjaśnić należy, że dyfuzyjność krzemogermanu zależy od procentowej zawartości Si i Ge. Gdy kryształ mieszany składa się praktycznie z krzemu, to jego dyfuzyjność cieplna jest bliska wartości uzyskiwanej dla czystego krzemu, gdy jest bliska 100% germanu, to jego dyfuzyjność cieplna jest wartością uzyskiwaną dla Ge. Już kilkoprocentowa zawartość jednej z domieszek powoduje pogorszenie się dyfuzyjności cieplnej do wartości $0,1 \text{ cm}^2/\text{s}$. Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej krzemogermanu dla różnych składów procentowych można znaleźć w [6].

Ideą prezentowanej pracy jest zastąpienie czujnika piezoelektrycznego wibrometrem laserowym. Układ pomiarowy z interferometrem Michelsona jako wibrometrem w układzie homodynowym przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys.3. Zastosowanie wibrometru w układzie interferometru Michelsona do badania dyfuzyjności cieplnej materiałów

Diody laserowe LD wzbudza próbkę do drgań. Badany obiekt zastępuje jedno z lusterek układu interferometru Michelsona. Dwie wiązki światła – referencyjna, biegnąca od lasera L i do detektora D, oraz wiązka pomiarowa, biegnąca od lustra L do próbki S i do detektora D, ulegają interferencji. Drgania obiektu o amplitudzie $x(t)$ powodują zmianę różnicy dróg optycznych między wiązkami $OPD = 2x(t)$, a co za tym idzie – zmianę intensywności światła padającego na detektor.

$$(3) \quad I(t) = I_R + I_M + 2\sqrt{I_R I_M} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x(t) + \varphi_0\right)$$

I_R, I_M są intensywnościami wiązek referencyjnej i pomiarowej, φ_0 – faza początkowa wynikająca z różnicy dróg optycznych przy braku wibracji, tzn. gdy $x(t) = 0$. Maksyma intensywności występują, gdy różnica dróg optycznych równa jest wielokrotności połowy długości fali: $OPD = N\lambda/2$. Aby uniezależnić się od zmian intensywności wiązek referencyjnej i pomiarowej, będących przyczyną np. fluktuacji intensywności światła laserowego, stosuje się detekcję kwadraturową. Interferującą wiązkę światła rozdziela się za pomocą płytki ćwierćfalowej na wiązki składowe, przesunięte względem siebie o 90° . Dwa detektory mierzą sygnały Q i I :

$$(4) \quad Q = \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x(t)\right) \text{ i } I = \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} x(t)\right)$$

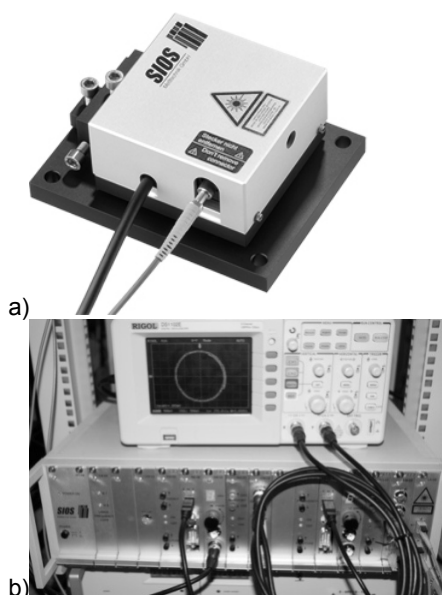
Amplitudę wibracji $x(t)$ wyznacza się z pomiaru przesunięcia fazowego sygnału kwadraturowego:

$$(5) \quad x(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$$

Istnieją również jeszcze bardziej złożone rozwiązania, np. układ heterodynowy. Przykłady konstrukcji i rozwoju układów interferometrów można znaleźć np. w [7, 8].

Stanowisko pomiarowe

Do badań wykorzystano wibrometr laserowy firmy SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau, Niemcy, z serii SP-S 120. W skład zestawu wchodzi głowica z interferometrem oraz urządzenie kontrolno-pomiarowe zawierające stabilizowany laser He-Ne (2mW). Światło z lasera jest dostarczane do głowicy pomiarowej za pomocą światłowodu. Podstawowe dane wibrometru to: zakres pomiarowy ≤ 20 mm (względem ogniska wiązki ustawianej na stałe za pomocą soczewki {30..70 mm lub 240 mm}); rozdzielczość 0,1 nm; długość fali lasera 632,8 nm; stabilność częstotliwościowa lasera $3 \cdot 10^{-7}$; czas wygrzewania 10 min; maksymalna częstotliwość wibracji 500 kHz; maksymalna prędkość ruchu 1,5 m/s. Do zestawu dołączone jest oprogramowanie umożliwiające pomiar odległości i pomiar widma wibracji. Moduł detekcji wibracji dostarcza wyjście sygnału analogowego proporcjonalnego do amplitudy chwilowej drgań $x(t)$. Urządzenie posiada także wyjście analogowe sygnału kwadraturowego I i Q , pozwalające na podłączenie własnego układu przetwarzania sygnału lub oscyloskopu monitorującego jakość sygnału (tak jak to pokazano na rysunku 4b).

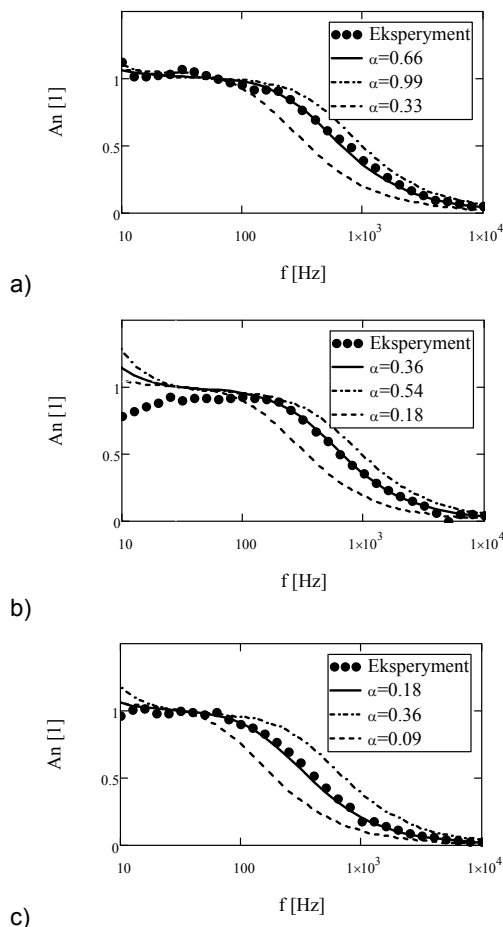


Rys.4. Wibrometr laserowy firmy SIOS Meßtechnik GmbH, Ilmenau, Niemcy, a) głowica pomiarowa, b) urządzenie kontrolno-pomiarowe

Głowicę pomiarową, uchwyt próbki oraz laser wzbudzający (dioda laserowa 405 nm, 30 mW) zamocowano na wspólnej ławie optycznej. Diodę laserową zasilano za pomocą sterownika LDC205 Thorlabs. Sygnał analogowy, proporcjonalny do amplitudy chwilowej wibracji, podłączono do wejścia wzmacniacza fazoczułego typu lock-in Stanford Research SR830. Generator lokalny wzmacniacza fazoczułego modulował intensywnością wiązki lasera wzbudzającego.

Eksperyment i analiza wyników

Pomiary charakterystyk częstotliwościowych przeprowadzono dla trzech próbek: #1 – Krzem typu p 10 Ω cm, $l = 525 \mu\text{m}$; #2 – German $l = 380 \mu\text{m}$; #3 – Krzemogerman o zawartości germanu 4,6% $l = 365 \mu\text{m}$.



Rys.5. Charakterystyki częstotliwościowe amplitudy drgań próbek: a) krzemu, b) germanu, c) krzemogermanu. Punkty oznaczają wyniki eksperymentalne, linia ciągła – wynik dopasowania, a linie przerywane pokazują przebieg charakterystyki dla dyfuzyjności α ($\pm 50\%$)

Próbki skierowane były w stronę interferometru powierzchnią wypolerowaną, gdyż wiązka odbita od warstwy niepolerowanej jest bardziej rozproszona, co pogarsza warunki detekcji. Wyniki pomiarów wraz z wynikami dopasowania charakterystyki modelowej przedstawiono na rysunku 5. Na wykresie pokazano również charakterystyki teoretyczne dla dyfuzyjności równej $\pm 50\%$ wartości dopasowania.

Uzyskano następujące wyniki dopasowania: Krzem – $\alpha = 0,66 \text{ cm}^2/\text{s}$; German – $\alpha = 0,36 \text{ cm}^2/\text{s}$; Krzemogerman – $\alpha = 0,18 \text{ cm}^2/\text{s}$.

Podsumowanie

W pracy wykazano, że możliwe jest zastosowanie laserowych wibrometrów interferometrycznych do badań właściwości cieplnych materiałów stosowanych w elektronice. Uzyskane wyniki pomiaru dyfuzyjności cieplnej wybranych materiałów pozostają w dużej zgodności z danymi literaturowymi. Zaproponowany przez autora sposób wykorzystania wibrometru pozwala na opracowanie zupełnie bezkontaktowej, z wykorzystaniem tylko promieni świetlnych, metody badania parametrów cieplnych materiałów.

Autor pragnie podziękować firmie LabSoft, a szczególnie Panu Bartoszowi Radkowskiemu, za udostępnienie wibrometru interferometrycznego SIOS Meßtechnik GmbH do testów.

LITERATURA

- [1] Zhou H., Damazo B.N., Silver R., Gonda S., Developing Atomic-resolution Measurements Using a Tunable Diode Laser-based Interferometer, *ASPE Proceedings*, (2003)
- [2] Jackson W., Amer N.M., Piezoelectric photoacoustic detection: Theory and experiment, *J. Appl. Phys.*, 51(1980), n6, 3343-3353
- [3] Blonskij J.V., Tkhoryk V.A., Shendeleva M.L., Thermal diffusivity of solids determination by photoacoustic piezoelectric technique, *J. Appl. Phys.*, 79 (1996), n7, 3512-3516
- [4] Maliński M., Fotoakustyka i spektroskopia fotoakustyczna materiałów półprzewodnikowych, *Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Monografia Wydziału Elektroniki - Koszalin*, (2004), nr 102
- [5] Zakrzewski J., Piezoelektryczna spektroskopia fototermiczna w objętości i na powierzchni półprzewodników A2B6, *Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika Toruń*, (2013)
- [6] Patrin A., Abrosimov N., Maliński M., Bychto L., The Influence of the Composition of Si-Ge Mixed Crystals on Thermal Diffusivity-Photoacoustic Approach, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 72 (2002), 579-587
- [7] Schot W., Dontsov D., Pöschel W., Developments in homodyne interferometry, *Technisches Messen*, 76 (2009), n.5, 239-244
- [8] Dosch J.J., Lally D.M., A heterodyne laser interferometer for primary calibration of accelerometers, *IMAC-XXI: Conference & Exposition on Structural Dynamics*, AR#79 (2003)

Autor: dr inż. Leszek Bychto, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: leszek.bychto@tu.koszalin.pl.