

Mirosław Maliński
Katedra Elektroniki
Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
miroslaw.malinski@tu.koszalin.pl

Metody fototermiczne i ich zastosowania - Wykład inauguracyjny roku akademickiego 2019/2020 na Wydziale Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej

Słowa kluczowe: fotoakustyka, metoda fototermiczna, modulowana absorpcja na swobodnych nośnikach, metoda piezoelektryczna, radiometria fototermiczna

1. Wprowadzenie

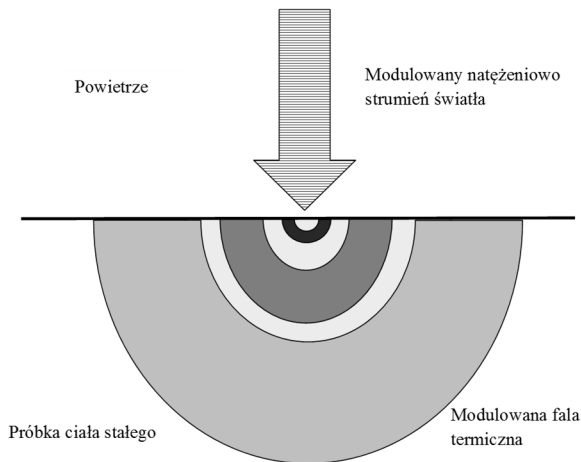
W pracy opisano szereg zagadnień związanych z zastosowaniem metod fototermicznych w metrologii materiałów półprzewodnikowych. Po krótkim wprowadzeniu w podstawy fizyczne zjawiska fototermicznego opisano wybrane rodzaje detekcji sygnałów fototermicznych oraz przedstawiono metody pomiarowe stosowane w metodzie fototermicznej. Praca przedstawia także opis różnych zastosowań fototermiki oraz stanowiska pomiarowe metod fototermicznych wykorzystywane w Katedrze Elektroniki Wydziału. Dla ilustracji zagadnienia przedstawiono przykładowe charakterystyki doświadczalne uzyskane opisanymi metodami fototermicznymi. Na zakończenie przedstawiono związek fototermiki z automatyką, elektroniką i elektrotechniką, a więc dyscypliną naukową uprawianą na Wydziale w Katedrze Elektroniki, a związaną ściśle z kierunkami kształcenia prowadzonymi na Wydziale takimi jak elektronika i telekomunikacja oraz informatyka.

2. Zjawisko fototermiczne

Fototermika jest dziedziną nauki, która wykorzystuje zjawisko absorpcji światła w oświetlanych materiałach i zmianę pochłoniętej w nich energii świetlnej na energię cieplną. Energia cieplna rejestrowana jest jako zmiana temperatury badanego ciała. Temperatura ta niesie informację o wielu procesach i parametrach badanych ciał takich jak: parametry termiczne, optyczne, rekombinacyjne, wydajnościowe.

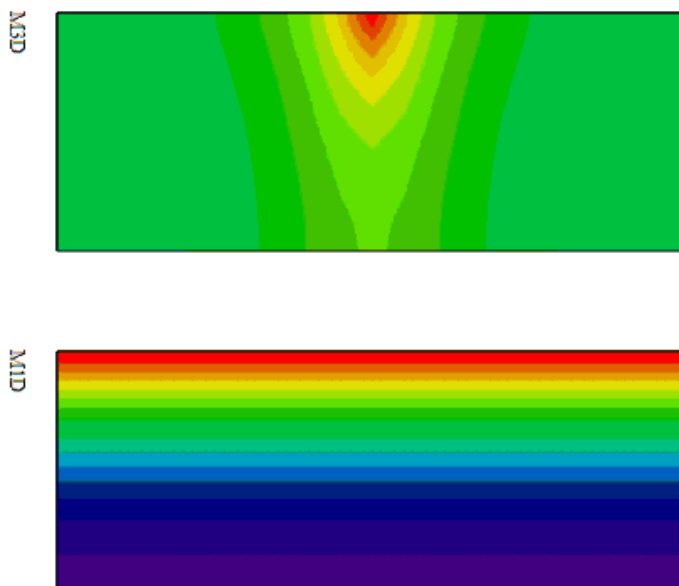
Fototermika jest więc działem metrologii. Pod pojęciem fototermiki, jako dziedziny techniki, rozumie się również zmianę energii słonecznej na energię cieplną jaka ma miejsce w kolektorach słonecznych w systemach grzewczych. Zagadnienie to nie jest jednak opisywane w niniejszej pracy.

Idea zjawiska fototermicznego jest przedstawiona schematycznie na Rys. 1. Modulowany natężeniowo strumień światła oświetla próbkę ciała stałego. W wyniku absorpcji promieniowania i zmianę energii świetlnej na energię termiczną, w wyniku rekombinacji bezpromienistej nośników, w próbce rozchodzi się modulowana fala termiczna.



Rys. 1. Idea zjawiska fototermicznego

Rozkład przestrzenny amplitudy fali termicznej może przyjmować różne formy zależnie od wielu parametrów. Przykładowe rozkłady amplitudy fali termicznej przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Rozkład przestrzenny amplitudy fali termicznej rozchodzącej się w próbce w przypadku wąskiej i szerokiej wiązki światła oświetlającej próbkę. Wg [1].

3. Rodzaje detekcji i metody pomiarowe

W metodzie fototermicznej stosuje się szereg rodzajów detekcji zależnie od wielkości fizycznej, która ma być rejestrowana, zależnej od rozchodzącej się fali termicznej w badanym materiale.

Jeżeli jest rejestrowana zmiana ciśnienia w komorze fotoakustycznej, będąca wynikiem zmiany temperatury powierzchni próbki, stosuje się metodę fotoakustyczną z detekcją mikrofonową.

Jeżeli rejestruje się zmiany kształtu próbki, będące wynikiem jej rozszerzania termicznego, stosuje się metodę piezoelektryczną z detekcją przetwornikiem piezoelektrycznym.

Jeżeli rejestruje się promieniowanie podczerwone emitowane przez próbkę, będące efektem okresowych zmian temperatury w całej objętości próbki, stosuje się detekcję czujnikiem na podczerwień.

Jeżeli rejestruje się okresową składową transmisji światła podczerwonego, będącą wynikiem okresowej zmiany koncentracji nośników w objętości próbki, to stosuje się metodę modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach.

Do innych rodzajów detekcji i metod pomiarowych stosowanych w metodzie fototermicznej zalicza się: metodę piroelektryczną, metodę mirażu oraz metodę termoodbiciową.

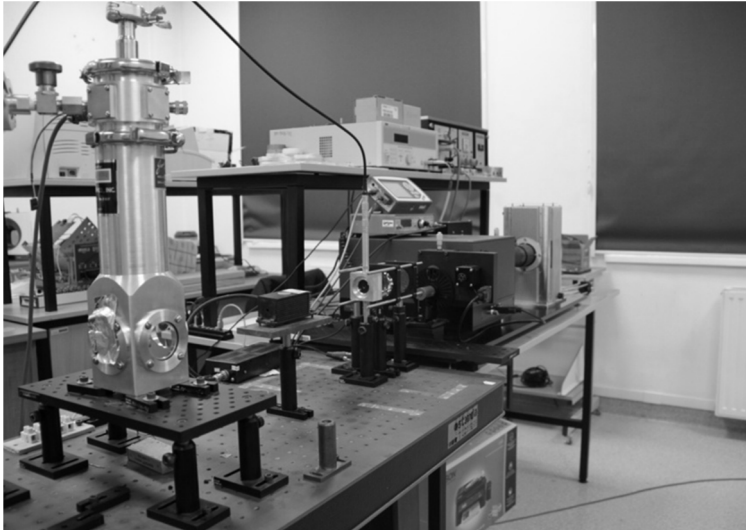
4. Zastosowania fototermiki

Metody fototermiczne podane powyżej stosuje się między innymi do:

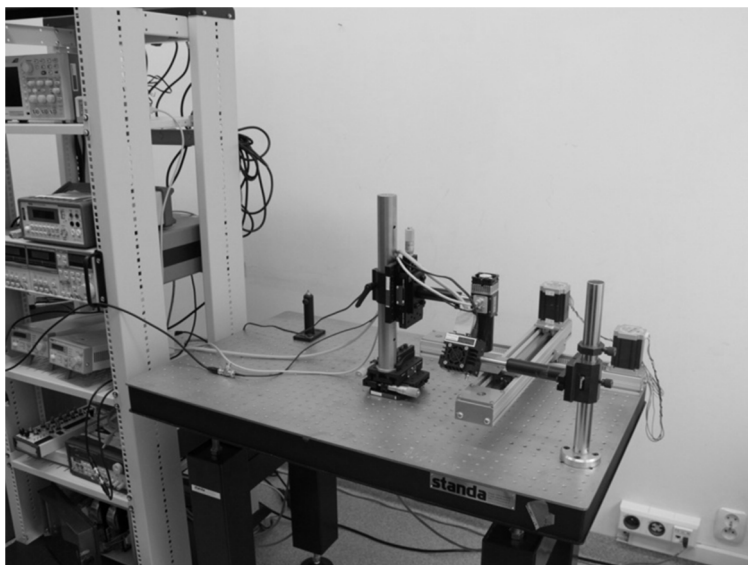
- Wyznaczania parametrów fizycznych materiałów i urządzeń takich jak: parametry cieplne, parametry optyczne i widma optyczne oraz parametry rekombinacyjne.
- Wyznaczania rozkładów przestrzennych parametrów materiałowych takich przykładowo jak czas życia nośników.
- Wyznaczania wydajności kwantowej i energetycznej fotoluminescencji oraz elektroluminescencji.
- Wyznaczanie wydajności energetycznej konwersji światła na prąd.

5. Stanowiska pomiarowe fototermiczne

Na zdjęciach poniżej przedstawiono stanowiska pomiarowe Katedry Elektroniki stosowane do pomiarów fotoakustycznych (Rys. 3), do pomiarów radiometrycznych w podczerwieni (Rys. 4), do pomiarów rozkładu przestrzennego modulowanej absorpcji na swobodnych nośnikach oraz prądów indukowanych wiązką światła (Rys. 5).



Rys. 3. Stanowisko do badań widm fotoakustycznych



Rys. 4. Stanowisko do badań charakterystyk radiometrii fototermicznej PTR

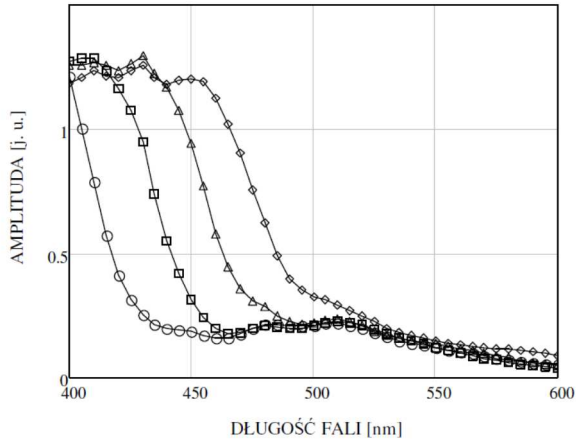


Rys. 5. Stanowisko do badań rozkładu modulowanej absorpcji na nośnikach swobodnych MFCA oraz LBIC

6. Przykładowe charakterystyki uzyskiwane metodami fototermicznymi

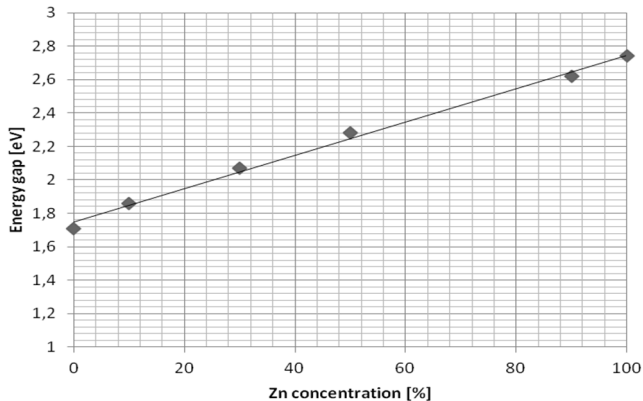
Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki doświadczalne uzyskiwane metodami fototermicznymi.

Przykładowe widma doświadczalne fotoakustyczne 'grubych' kryształów mieszanych przedstawiono na Rys. 6.



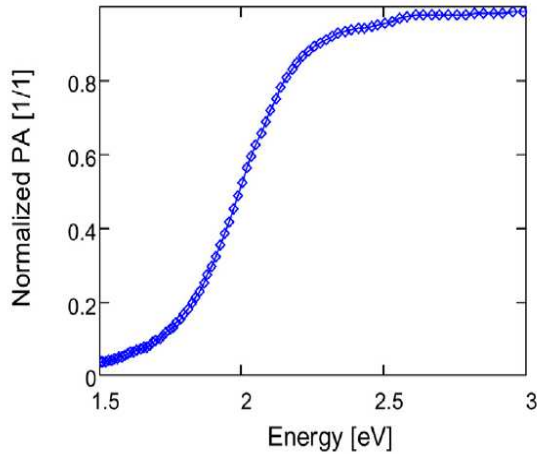
Rys. 6. Widma fotoakustyczne kryształów mieszanych $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ dla różnej zawartości jonów Be. Wg [2].

Zależność wielkości przerwy energetycznej 'grubych' kryształów mieszanych $CdZn_xSe_{1-x}$ od koncentracji Zn przedstawiono na Rys. 7.

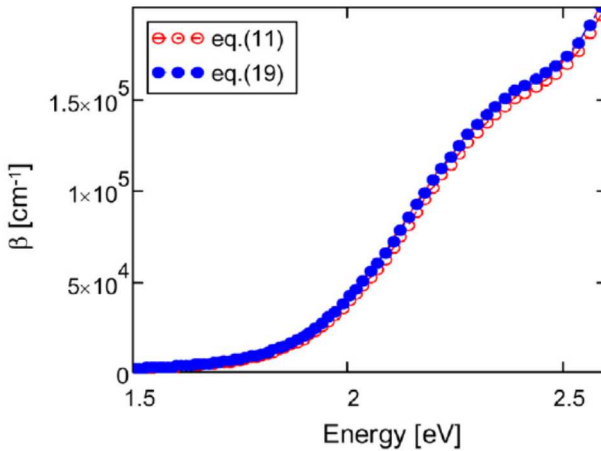


Rys. 7. Zależność wielkości przerwy energetycznej od składu kryształu mieszanego $CdZn_xSe_{1-x}$. Wg [3].

Widma fotoakustyczne oraz widma współczynnika absorpcji optycznej 'cienkich' warstw półprzewodnikowych In_2S_3 przedstawiono odpowiednio na Rys. 8 i 9.

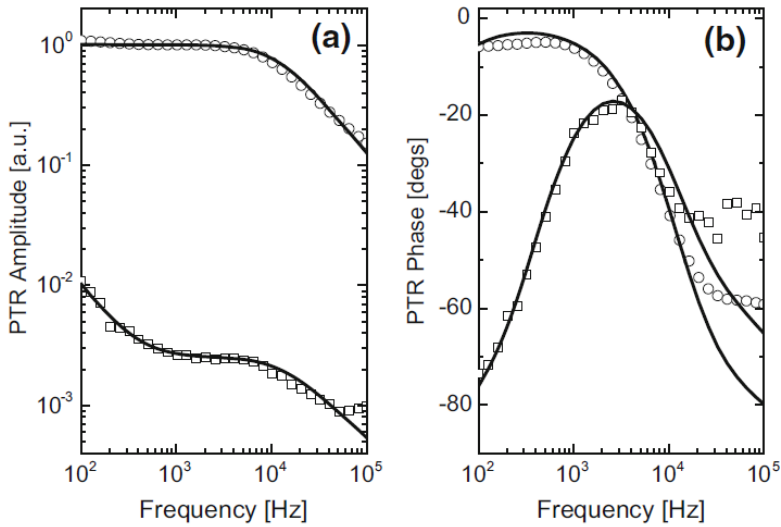


Rys. 8. Widmo fotoakustyczne cienkiej warstwy $d=0.17 \mu\text{m}$ In_2S_3 . Wg [4].



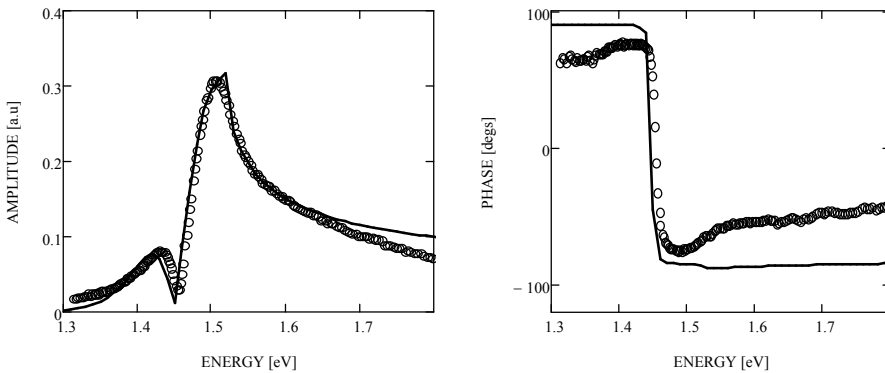
Rys. 9. Widmo współczynnika absorpcji optycznej cienkiej warstwy, $d=0.17 \mu\text{m}$, In_2S_3 . Wg [4].

Przykładowe charakterystyki doświadczalne uzyskane w metodzie radiometrii fototermicznej przedstawiono na Rys. 10.



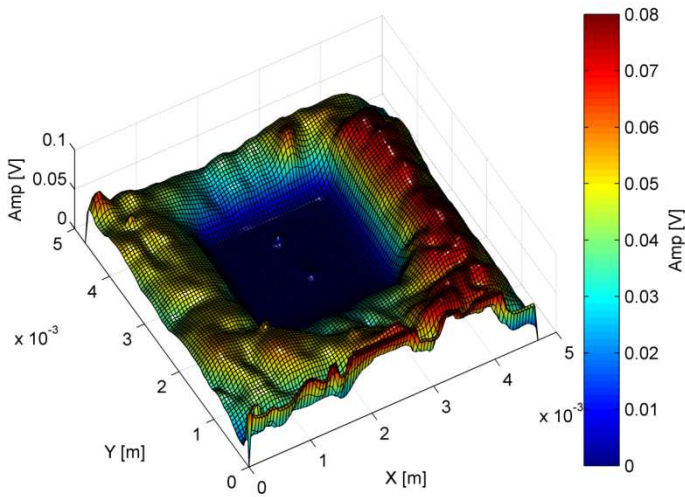
Rys. 10. Charakterystyki sygnału PTR uzyskane dla próbek Si przed i po implantacji wysoko energetycznymi jonami O^{+6} . Wg [5].

Przykładowe charakterystyki doświadczalne uzyskane w detekcji piezoelektrycznej przedstawiono na Rys. 11.



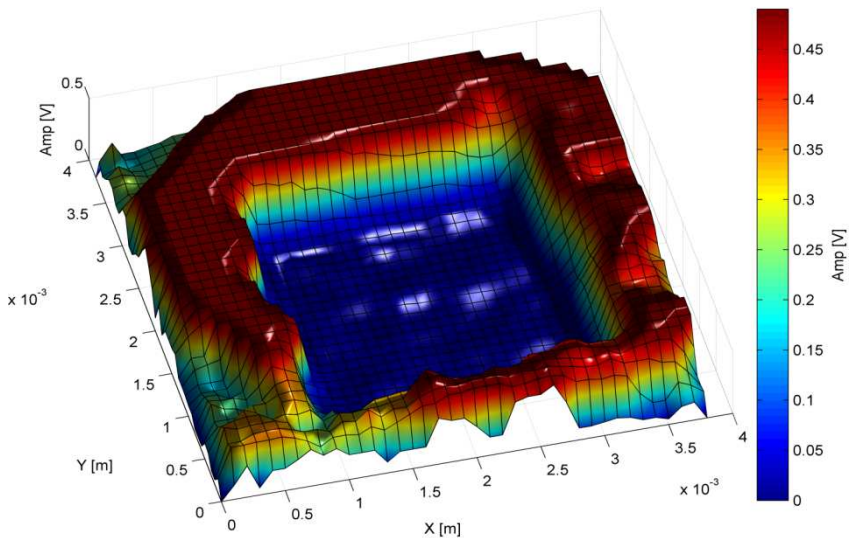
Rys. 11. Widma piezoelektryczne amplitudowe i fazowe kryształu CdTe – model dwuwarstwowy. Grubość warstwy zdefektowanej $d=0.5 \mu\text{m}$. Wg [6].

Przykładowe charakterystyki doświadczalne rozkładu przestrzennego sygnału PTR uzyskane doświadczalnie przedstawiono na Rys. 12.



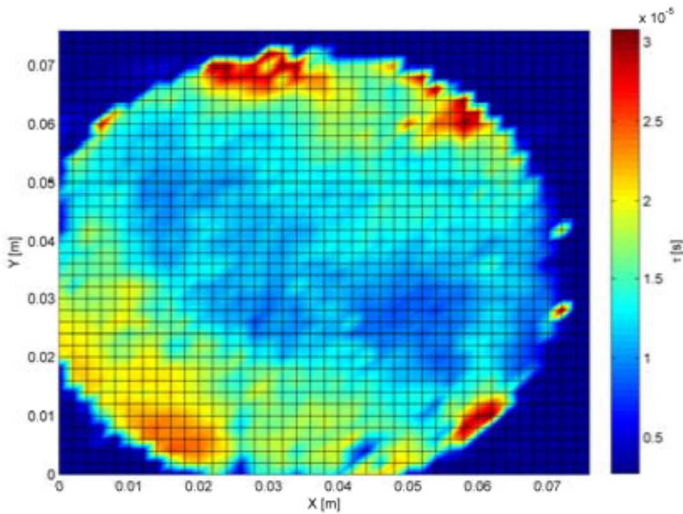
Rys. 12. Rozkład przestrzenny sygnału PTR uzyskany na próbce Si implantowanego Au^{2+} $\lambda_{\text{ex}} = 480 \text{ nm}$, $f=1\text{kHz}$. Wg [7].

Przykładowe rozkłady przestrzenne sygnału MFCA przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 13. Rozkład przestrzenny sygnału MFCA uzyskany na próbce Si implantowanej jonami Mn^+ . Wg [8].

Przykładowy rozkład przestrzenny czasu życia nośników uzyskany na płycie krzemowej metodą MFCA przedstawiono na Rys. 14.



Rys. 14. Rozkład przestrzenny czasu życia nośników uzyskany na płycie krzemowej metodą MFCA. Wg [9].

7. Związek fototermiki z elektroniką, automatyką i informatyką

Metody fototermiczne mają silny związek z elektroniką, automatyką i informatyką co przedstawiono poniżej.

- Czujniki stosowane w badaniach są elementami elektronicznymi: mikrofony, przetworniki piezoelektryczne, detektory podczerwieni
- Mierzone sygnały są bardzo małe wymagające przedwzmacniaczy i technik fazoczułych
- Źródła światła to najczęściej lasery sterowane sygnałami elektrycznymi
- Pomiaru są sterowane komputerowo z wykorzystaniem oprogramowania sterującego: stoliki X-Y, monochromatory, wzmacniacze fazoczułe, modulatory
- Wyniki pomiarów zapisywane są w komputerach
- Wyniki pomiarów są następnie obrabiane komputerowo celem wyciągnięcia z nich użytecznych informacji.

Wymaga to przeprowadzenia szeregu działań:

- stworzenia modeli badanych zjawisk w oparciu o ich analizę fizyczną
- napisania dedykowanych arkuszy obliczeniowych w Matlabie, Mathcadzie czy też aplikacji w C++ czy Javie
- przeprowadzenia dopasowań krzywych teoretycznych do krzywych doświadczalnych, w których parametrem dopasowania jest szukanym parametrem materiałowym.

8. Podsumowanie

Proces badawczy w fototermice jest więc mariażem szeregu dyscyplin naukowych:

- fizyki
- elektroniki
- automatyki
- informatyki
- matematyki

Wszystkie te dyscypliny poznają studenci w trakcie studiów na Wydziale Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej.

Bibliografia

1. L. Bychto, M. Maliński, „*ID or 3D spatial distribution – comparison*”, Journal de Physique IV 117(2004) 17-23
2. M. Maliński, Ł. Chrobak, J. Zakrzewski, K. Strzałkowski, „*Determination of the Quantum Efficiency of Luminescence in Mn²⁺ Ions in Zn_{0.75} Be_{0.20} Mn_{0.05} Se Crystals by the Nondestructive Photoacoustic Method*”, Optical Materials 33 (2010) 75-78.
3. J. Zakrzewski, K. Strzałkowski, M. Maliński, „*Piezoelectric Photothermal Spectroscopy of CdZnSe Mixed Crystals*”, Proceedings 20th ICPPP Moscow (2019).
4. L. Bychto, M. Maliński, „*Photoacoustic spectroscopy analysis of thin semiconductor samples*”, Opto-Electronics Review 26 (2018) 217-222
5. M. Maliński, M. Pawlak, Ł. Chrobak, S. Pal, A. Ludwig, „*Monitoring of amorfization of the oxygen implanted layers in silicon wafers using photothermal radiometry and modulated free carrier absorption methods*”, Applied Physics A 118 (2015) 1009-1014.

6. J. Zakrzewski, K. Strzałkowski, M. Maliński, Ł. Chrobak, „*Two-layer model in piezoelectric photothermal spectra of CdTe crystals*”, International Journal of Thermophysics 40 (2019) 56-66.
7. Ł. Chrobak, M. Maliński, „*On investigations of the optical absorption coefficient of gold and germanium implanted silicon with the use of the nondestructive contactless photothermal infrared radiometry*”, Journal of Electronic Materials 48(8) (2019) 5273-5278
8. Ł. Chrobak, M. Maliński, „*Properties of Silicon Implanted with Fe⁺, Ge⁺, Mn⁺ Ions Investigated Using a Frequency Contactless Modulated Free-Carrier Absorption Technique*”, Optical Materials 86 (2018) 484-491.
9. M. Maliński, L. Bychto, Ł. Chrobak, W. Madej, „*Mapowanie czasu życia nośników w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach*”, Przegląd Elektrotechniczny 91(9) (2015) 113-116.

Streszczenie

Praca przedstawia metody fototermiczne jakie są stosowane w badaniach materiałów półprzewodnikowych w Katedrze Elektroniki Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej. W pracy przedstawiono również badawcze stanowiska fototermiczne w Katedrze, a także uzyskane wybrane charakterystyki doświadczalne.

Abstract

This paper presents photothermal methods which are used in the research of semiconductor materials in the Department of Electronics of the Faculty of Electronics and Computer Science of the Koszalin University of Technology. In this paper the experimental photothermal research set ups of the Department as also the chosen obtained experimental characteristics are presented.

Keywords: photoacoustics, photothermal method, modulated free carriers absorption modulowana, piezoelectric method, photothermal radiometry.