

Zastosowania metody fotoakustycznej w badaniach parametrów optycznych i rekombinacyjnych materiałów półprzewodnikowych

Mirosław Maliński

Wydział Elektroniki i Informatyki
Politechnika Koszalińska
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Polska

Streszczenie

W pracy przedstawiono przykładowe wyniki badań fotoakustycznych, wykonanych w Katedrze Podstaw Elektroniki, szeregu materiałów półprzewodnikowych w okresie ostatnich 5 lat. Założenia jest to przegląd przeprowadzonych badań w tym okresie czasu ilustrujący obszar poszukiwań naukowych w dziedzinie fotoakustyki i jej zastosowań do charakteryzacji optycznej, termicznej i rekombinacyjnej ciał stałych. Jest to też okazja do podsumowania uzyskanych w tym czasie wyników badań i wskazanie kierunków dalszych poszukiwań.

Wstęp

Metoda fotoakustyczna jest narzędziem badań, w którym wykorzystuje się efekt generacji strumienia ciepła w próbce wywołany jej oświetleniem wiązką światła o zmodulowanym periodycznie natężeniu. Efekt ten został opisany przez A.Rosencwaiga i A.Gersho w pracy [0.1] dla detekcji mikrofonowej oraz przez W.Jacksona i N.Amera [0.2] dla detekcji piezoelektrycznej przy założeniu, iż jedynym efektem jaki towarzyszy absorpcji światła jest rekombinacja bezpromienista nośników, których czas życia jest bardzo krótki w porównaniu z okresem modulacji natężenia absorbowanej wiązki światła. Modele powyższe były również jednowarstwowe. Wpływ czasu życia nośników generowanych światłem na charakterystyki częstotliwościowe sygnału fotoakustycznego przedstawił M.D.Dramicanin i współpracownicy w pracy [0.3]. Jest to rozszerzenie teorii A.Rosencwaiga dla detekcji mikrofonowej uwzględniające fakt, iż sygnał fotoakustyczny jest rezultatem trzech procesów relaksacji bezpromienistej: szybkiej relaksacji wewnątrzpasmowej, dyfuzji nośników i ich relaksacji bezpromienistej w objętości próbki oraz dyfuzji nośników i ich relaksacji bezpromienistej na powierzchniach próbki. Takie rozszerzenie teorii również nie wyczerpywało wszystkich przypadków z jakimi mamy do czynienia w rzeczywistości i istniejące teorie nie pozwalały na teoretyczną interpretację obserwowanych doświadczalnie charakterystyk fotoakustycznych. Powodowało to konieczność rozbudowy istniejących teorii, a następnie ich weryfikacji poprzez teoretyczną analizę rzeczywistych charakterystyk fotoakustycznych.

Wyniki badań prezentowanych przeglądowo w niniejszej pracy obejmują szereg zagadnień takich jak: analiza numeryczna widm piezoelektrycznych w tym w modelu stanów powierzchniowych, badania parametrów rekombinacyjnych materiałów półprzewodnikowych i ich wpływu na widma fotoakustyczne, analiza widm mikrofonowych fotoakustycznych wybranych materiałów, analizę układów warstwowych, pomiary parametrów termicznych kryształów mieszanych metodą piezoelektryczną, pomiary szczelności obudów elementów elektronicznych.

Przegląd wyników badań

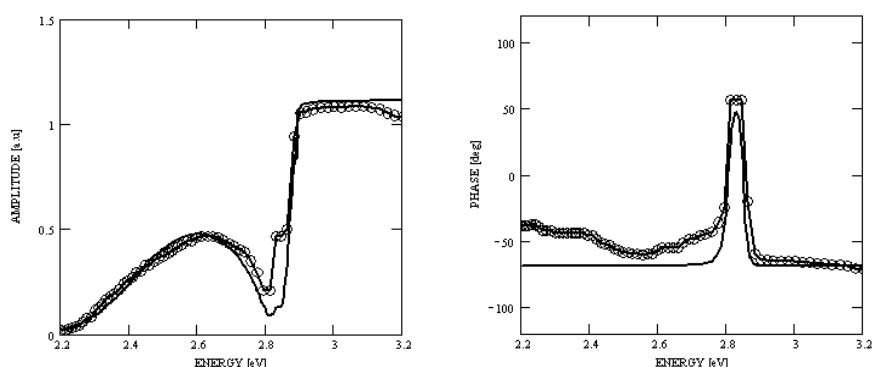
1) Spektroskopia piezoelektryczna w tym stanów powierzchniowych

Detekcja piezoelektryczna jest jednym z narzędzi badawczych stosowanych w celu wyznaczenia widm współczynnika absorpcji optycznej materiałów półprzewodnikowych, wartości ich przerwy energetycznej oraz parametrów ogona Urbacha. Technika ta jest rzadko stosowana z powodu trudności pomiarowych, a także z powodu skomplikowanego aparatu teoretycznego jaki należy stosować do interpretacji numerycznych doświadczalnych widm fotoakustycznych. Generalnie efekt ten polega na wygenerowaniu, w wyniku absorpcji światła w próbce, przestrzennego, periodycznie zmiennego rozkładu temperatury. W wyniku takiego rozkładu temperatury w próbce powstają dwa efekty: efekt tłokowy związany z periodycznym rozszerzaniem się próbki oraz efekt membranowy będący wynikiem gradientu temperatury w próbce polegający na periodycznym wyginaniu się próbki. Ruchy powierzchni próbki są rejestrowane przetwornikiem piezoelektrycznym. Spektroskopia piezoelektryczna polega na pomiarze amplitudy i fazy sygnału piezoelektrycznego w funkcji długości fali światła absorbowanego w próbce dla danej częstości modulacji natężenia wiązki światła.

Problem polega na wyliczeniu widma absorpcji optycznej próbki z jej doświadczalnego widma piezoelektrycznego w warunkach gdy analizowane równanie nie ma rozwiązania analitycznego. Analiza rzeczywistych widm piezoelektrycznych szczególnie kryształów mieszanych wykazała konieczność rozbudowy i tak złożonego modelu o absorpcję na stanach powierzchniowych i ich wpływ na widma piezoelektryczne, a także uwzględnienie niejednorodności kryształów mieszanych w modelu teoretycznym.

Wyniki badań spektroskopowych stanów powierzchniowych, teoretycznych i doświadczalnych, z wykorzystaniem detekcji piezoelektrycznej kryształów mieszanych $Zn_{0.81}Be_{0.04}Mg_{0.15}Se$ przedstawiono w pracach [1.1, 1.2] i pokazano na Rys.1. Wyniki badań stanów powierzchniowych kryształów mieszanych $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ przedstawiono w pracach [1.3,1.4,1.6]. Teorię rejestracji i analizy stanów powierzchniowych z wykorzystaniem detekcji piezoelektrycznej przedstawiono w pracy [1.5]. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni na widma piezoelektryczne kryształów $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ przedstawiono w pracy [1.7]. Wyniki badań widm piezoelektrycznych

kryształów $Zn_{1-x}Be_xTe$ and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ zinterpretowane w modelu kryształu niejednorodnego przedstawiono w pracy [1.8]. Analizę widm doświadczalnych kryształów $Cd_{1-x-y}Be_xZn_y$ przedstawiono w pracy [1.9]. Analizę numeryczną widm piezoelektrycznych szeregu innych materiałów półprzewodnikowych przedstawiono w pracy [1.10]. Wyniki badań nowych konfiguracji eksperymentalnych w pomiarach spektroskopowych piezoelektrycznych przedstawiono w pracy [1.11]. Wyniki badań widm kryształów $Cd_{1-x}Be_xSe$ przedstawiono w pracy [1.12]. Badania porównawcze kryształów $Zn_{1-x}Be_xTe$ techniką piezoelektryczną i detekcją promieniowania w podczerwieni przedstawiono w pracy [1.13]. Porównanie teoretycznych widm piezoelektrycznych uzyskanych w modelu 1D i 3D przedstawiono w pracy [1.14]. Analizę widm piezoelektrycznych kryształów $Cd_{1-x}Mn_xTe$ przedstawiono w pracy [1.15]. Wpływ stanów powierzchniowych na widma piezoelektryczne krzemu przedstawiono w pracy [1.16]. Przykładowe widma piezoelektryczne doświadczalne i teoretyczne kryształu mieszanego przedstawiono na Rys.1.



Rys.1. Widma fotoakustyczne piezoelektryczne amplitudowe i fazowe kryształów $Zn_{1-x-y}Be_xMg_ySe$. Kółka – widma doświadczalne, linia ciągła – krzywe teoretyczne policzone w modelu stanów powierzchniowych.(Wg pracy [1.1]).

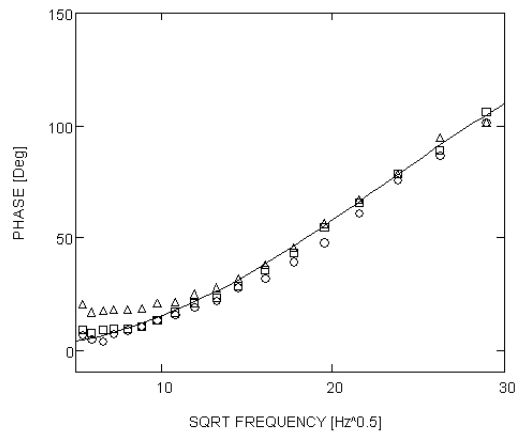
2) Badania parametrów rekombinacyjnych materiałów półprzewodnikowych i ich wpływ na widma fotoakustyczne

Sygnal fotoakustyczny zależy od parametrów rekombinacyjnych takich jak: czas życia nośników, współczynnik dyfuzji nośników, prędkość rekombinacji powierzchniowej nośników oraz od dyfuzyjności termicznej materiału, grubości próbki, częstotliwości modulacji i innych parametrów. Celem prowadzonych badań było znalezienie optymalnej konfiguracji próbki w komorze, sposobu jej przygotowania oraz metodologii wyznaczania głównie czasu życia nośników nadmiarowych generowanych światłem przy

bardzo złożonym modelu i wieloparametrowych zależnościach sygnału fotoakustycznego.

Rezultaty badań parametrów rekombinacyjnych próbek krzemu z wykorzystaniem częstotliwościowej techniki fotoakustycznej z detekcją mikrofonową przedstawiono w pracy [2.1]. Analizę teoretyczną wpływu fal plazmowych na widma fotoakustyczne mikrofonowe i piezoelektryczne przedstawiono w pracy [2.2]. Porównanie modeli plazmowych stosowanych w fotoakustyce oraz opis zaproponowanego modelu kompaktowego przedstawiono w pracy [2.3]. Model ten został następnie zastosowany do badań wielu materiałów i przetestowany praktycznie.

Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe, uzyskane dla próbek krzemowych, służące do wyznaczania czasu życia nośników nadmiarowych przedstawiono na Rys.2.

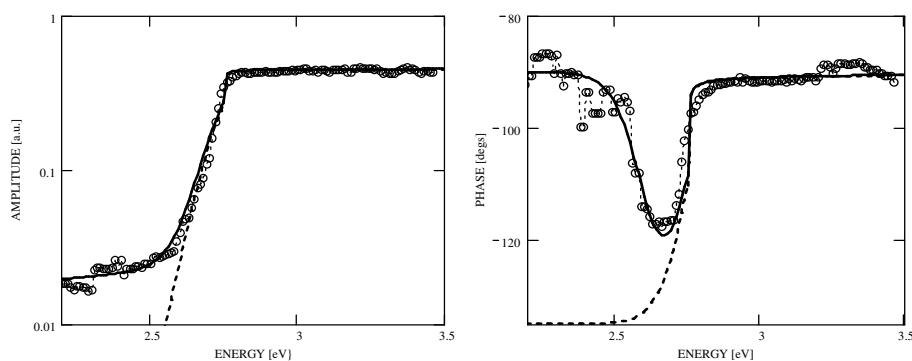


Rys.2. Charakterystyki różnicy faz, doświadczalne i teoretyczne, uzyskane dla trzech próbek Si w dwóch konfiguracjach eksperymentalnych. Parametry dopasowania: $V_g=1500$ cm/s, $V_b=100$ cm/s and $V_g=100$ cm/s $V_b=1500$ cm/s oraz $\alpha=0.8$ cm²/s, $\tau=1 \cdot 10^{-3}$ s, $d=0.04$ cm, $\beta=10^3$ cm⁻¹, $D=15$ cm²/s. Linia ciągła jest krzywą teoretyczną, kółka, trójkąty i kwadraty są danymi doświadczalnymi. (Wg pracy [2.1]).

3) Spektroskopia mikrofonowa materiałów półprzewodnikowych

Spektroskopia fotoakustyczna z detekcją mikrofonową polega na rejestracji periodycznych zmian ciśnienia w komorze akustycznej, w funkcji długości fali absorbowanego światła, będących wynikiem periodycznie zmiennej temperatury próbki. Zmiany ciśnienia są rejestrowane mikrofonem. Problem naukowy polega na wyznaczeniu widma absorpcji optycznej badanego materiału z jego widma doświadczalnego sygnału fotoakustycznego i jego analizy. Podobnie jak w przypadku detekcji piezoelektrycznej tak i tu zagadnienie nie ma rozwiązania analitycznego.

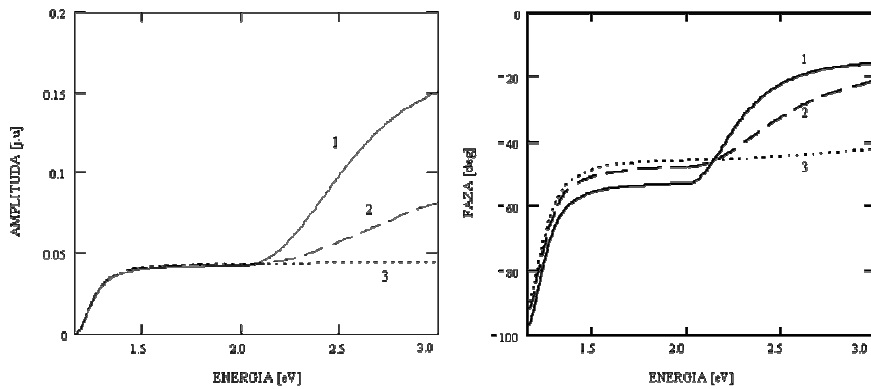
Wyniki badań widm fotoakustycznych kryształów mieszanych $Zn_{1-x}Be_xTe$ przedstawiono w pracy [3.1]. Wpływ stanów powierzchniowych na mikrofonowe widma fotoakustyczne kryształów ZnBeSe przedstawiono w pracy [3.2]. Przykładowe widma doświadczalne fotoakustyczne w rejestracji mikrofonowej, próbek wykazujących stany powierzchniowe, przedstawiono na Rys.3.



Rys. 3. Amplitudowe (a) i fazowe (b) mikrofonowe widma fotoakustyczne kryształu $Zn_{0.965}Be_{0.035}Se$ zmierzone dla $f=25$ Hz. Kółka – wyniki doświadczalne. Linia ciągła gruba – krzywa teoretyczna przerywana policzona w modelu absorpcji objętościowej. Krzywe ciągłe grube są krzywymi teoretycznymi policzonymi w modelu z udziałem stanów powierzchniowych. (Wg pracy [3.2]).

4) Badania układów warstwowych

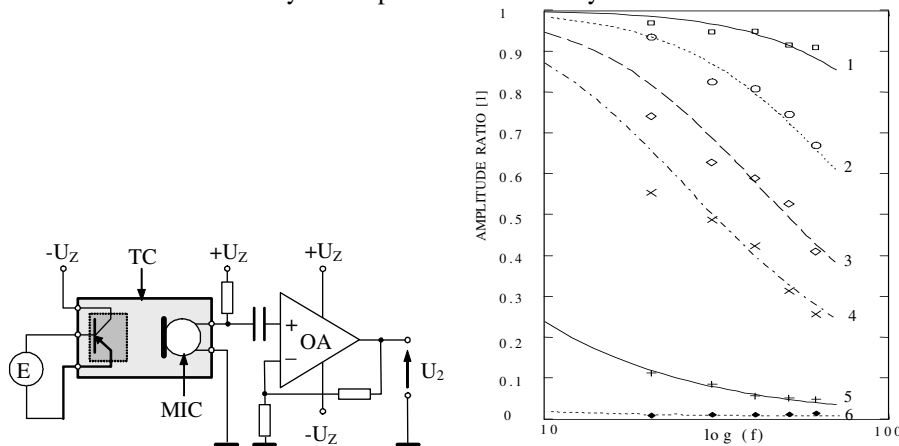
Badania teoretyczne rozkładu temperatury w układach warstwowych przedstawiono w pracy [4.1]. Model teoretyczny sygnału fotoakustycznego od układu cienkiej warstwy na termicznie grubym podłożu przedstawiono w pracy [4.2]. Przykładowe widma fotoakustyczne krzemu porowatego na krzemie krystalicznym wyliczone według zaproponowanego modelu dla różnych grubości warstw krzemu porowatego przedstawiono na Rys.4.



Rys.4. Widma fotoakustyczne amplitudowe krzemu porowatego na krzemie krystalicznym dla $\alpha=0.016 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ i $f=500 \text{ Hz}$ dla grubości krzemu porowatego: 1) $d=10 \mu\text{m}$, 2) $d=5 \mu\text{m}$, 3) $d=1 \mu\text{m}$. Porowatość krzemu $p=70 \%$. (Wg pracy [4.2]).

5) Pomiary szczelności obudów elementów elektronicznych

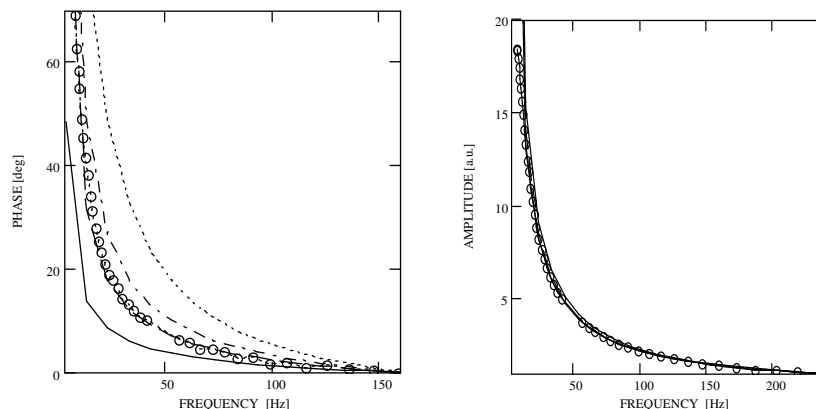
Wyniki badań szczelności różnych obudów elementów elektronicznych przedstawiono w pracach [5.1, 5.2, 5.3]. Opracowaną teorię detekcji i opisu nieszczelności w technice termo akustycznej przedstawiono w pracy [5.4]. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe amplitudowe nieszczelnych tranzystorów o kontrolowanym promieniu nieszczelności oraz schemat poglądowy układu doświadczalnego do pomiarów nieszczelności obudów tranzystorów przedstawiono na Rys.5.



Rys.5. Charakterystyki częstotliwościowe nieszczelnych tranzystorów o różnych promieniach dziur: 1) $r = 108 \mu\text{m}$; 2) $r = 91 \mu\text{m}$; 3) $r = 78 \mu\text{m}$; 4) $r = 69 \mu\text{m}$; 5) $r = 42 \mu\text{m}$; 6) $r = 24 \mu\text{m}$. Linie – krzywe teoretyczne, punkty – wyniki doświadczalne. (Wg pracy [5.2]).

6) Pomiary parametrów termicznych materiałów półprzewodnikowych

Pomiary dyfuzyjności termicznej kryształów $Zn_{1-x}Be_xSe$ z wykorzystaniem charakterystyk częstotliwościowych piezoelektrycznych przedstawiono w pracy [6.1]. Wyniki pomiarów parametrów termicznych cienkich warstw krzemu porowatego na krzemie krystalicznym techniką częstotliwościową z detekcją mikrofonową przedstawiono w pracy [6.2]. Przykładowe charakterystyki fazowe i amplitudowe piezoelektryczne kryształu $Zn_{85}Be_5Mn_{20}Se$ przedstawiono na Rys.6.



Rys.6. Fazowe a) amplitudowe b) eksperymentalne i teoretyczne charakterystyki częstotliwościowe piezoelektryczne kryształu $Zn_{85}Be_5Mn_{20}Se$. Kółka – wartości doświadczalne, linie są krzywymi teoretycznymi. Linie ciągłe, przerywane, przerywane-kropkowane i kropkowane odpowiadają odpowiednio wartościom termicznych dyfuzyjności: $\alpha=0.01, 0.03, 0.05, 0.1 \text{ cm}^2/\text{s}$. (Wg pracy [6.1]).

7) Inne zastosowania efektu fotoakustycznego i prace przeglądowe

Zastosowano technikę fotoakustyczną do badań wydajności kwantowej luminescencji w kryształach AII-BVI [7.1]. Analizę możliwości wykorzystania charakterystyk częstotliwościowych do charakteryzacji materiałów półprzewodnikowych przedstawiono w pracy [7.2]. Analizę możliwości wykorzystania techniki termo akustycznej do termicznej i optycznej charakteryzacji materiałów przedstawiono w pracy [7.3].

8) Aktualnie prowadzone badania

Wpływ efektu plazmowego na charakterystyki częstotliwościowe fotoakustyczne kryształów krzemu celem znalezienia optymalnej konfiguracji do wyznaczania czasów życia nośników nadmiarowych w próbkach krzemowych. Wykorzystanie efektu fotoakustycznego w spektrometrze transmisyjnym i porównanie widm transmisyjnych

z widmami fotoakustycznymi. Analiza numeryczna doświadczalnych widm fotoakustycznych krzemu porowatego na krzemie krystalicznym w ramach opracowanego modelu teoretycznego celem określenia charakteru widma absorpcji optycznej krzemu porowatego. Analiza wpływu obróbki powierzchniowej próbek krzemu oraz wybranych materiałów AII-BVI na ich widma fotoakustyczne celem opracowania ilościowej metody oceny jakości powierzchni płytek półprzewodnikowych. Opracowanie metody wyznaczania czasu życia nośników nadmiarowych krzemu zmodyfikowaną metodą Stevensona oraz opracowanie metody fotoakustycznej do wyznaczania wydajności konwersji energii w centrach świecących materiałów optoelektronicznych.

Podsumowanie

Wyniki badań fotoakustycznych prowadzonych w okresie ostatnich kilku lat wskazują na potencjalnie duże możliwości wykorzystania efektu fotoakustycznego do wyznaczania parametrów termicznych, optycznych oraz rekombinacyjnych materiałów elektroniki i optoelektroniki. Planuje się nadal rozwijać tą metodę badawczą poprzez rozbudowę istniejących stanowisk laboratoryjnych, budowę nowych oraz poszukiwanie nowych spektakularnych zastosowań efektu fotoakustycznego w elektronice. Prowadzone badania mieszczą się w następujących działach Polskiej Klasyfikacji Tematycznej: 421000 Podstawy Fizyczne Elektroniki, 421300 Materiały elektroniczne, 423900 Optoelektronika, 424100 Piezoelektronika. Na aktualność prowadzonych w opisywanym okresie badań oraz wartość uzyskanych rezultatów wskazywać może fakt, iż zdecydowana większość prac opisujących uzyskane rezultaty badawcze ukazała się w czasopiśmie z listy filadelfijskiej.

Literatura.

- [0.1] A.Rosencwaig, A.Gersho J.Appl. Phys. 47(1), 64-72, (1976).
- [0.2] W.Jackson, N.Amer J.Appl.Phys. 51(6),3343-3349, (1980).
- [0.3] M.D.Dramicanin, Z.D.Ristovski, P.M.Nicolic, D.G.Vasiljevic, D.M.Todorovic Physical Review B **51** (20) (1995), pp.14226-14232.
- [1.1] M.Maliński, J.Zakrzewski, K. Strzałkowski, S. Łęgowski, F.Firszt, H. Męczyńska, 'Piezoelectric photoacoustic spectroscopy of surface states of $Zn_{0.81}Be_{0.04}Mg_{0.15}Se$ mixed crystals' Surface Science – 603(1),131-137 (2009).
- [1.2] M.Maliński, J.Zakrzewski, K.Strzałkowski, S.Łęgowski 'Photoacoustic spectroscopy of ZnBeMgSe mixed crystals' Acta Acustica United with Acustica **94**, 250-253 (2008).

- [1.3] J.Zakrzewski, M.Maliński, K.Strzałkowski, F.Firszt, S.Łęgowski, H.Męczyńska 'Piezoelectric spectroscopic studies of $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ mixed Crystals' European Physical Journal-Special Topics 154, 381-385 (2008).
- [1.4] J.Zakrzewski, M.Maliński, K.Strzałkowski, F.Firszt, S.Łęgowski, H.Męczyńska 'Study of $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ mixed crystals by photothermal method' European Physical Journal **153**, 267-270 (2008).
- [1.5] M.Maliński, J.Zakrzewski 'Piezoelectric theory of detection of surface states' European Physical Journal-Special Topics **154**, 345-349 (2008).
- [1.6] M.Maliński, J.Zakrzewski, K.Strzałkowski 'Numerical analysis of piezoelectric spectra of $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ mixed crystals' International Journal of Thermophysics USA V.28 No 1 (2007), 299-316.
- [1.7] J.Zakrzewski, M.Maliński, K.Strzałkowski, F.Firszt, S.Łęgowski, H.Męczyńska, A.Marasek, M.Pawlak 'The influence of the surface preparation on the piezoelectric spectra of $Zn_{1-x-y}Be_xMn_ySe$ mixed crystals' J. de Physique IV France – 137, 2006, 381-384.
- [1.8] M.Maliński, J.Zakrzewski 'Application of the inhomogeneous sample model in the piezoelectric spectroscopy of $Zn_{1-x}Be_xTe$ and $Cd_{1-x}Mn_xTe$ mixed crystals' International Journal of Thermophysics USA – 26(1), 269-284 (2005).
- [1.9] J.Zakrzewski, F. Firszt, S.Łęgowski, H. Męczyńska, A.Marasek, M.Pawlak, K.Strzałkowski, M.Maliński, L.Bychto 'Piezoelectric photothermal study of $Cd_{1-x-y}Be_xZn_y$ crystals' Proc 13 ICPPP Brazylia 2004 J.de Physique IV France 125, (2005),437-476.
- [1.10] M.Maliński, L.Bychto, J.Zakrzewski, F.Firszt, M.Pawlak, P.Binnebesel 'Investigations of AII-BVI mixed crystals with the piezoelectric photothermal method' – Journal de Physique IV Proceedings 125, 2005, 379-382, 13th ICPPP.
- [1.11] L.Bychto, M.Maliński, J.Zakrzewski, S.Łęgowski, H.Męczyńska 'Experimental verification of new configurations in the piezoelectric photothermal spectroscopy of semiconductor materials' J.de Physique IV France 117, 25-28 (2004).
- [1.12] J.Zakrzewski, M.Pawlak, F.Firszt, S.Łęgowski, A.Marasek, H.Męczyńska, M.Maliński 'Photoacoustic studies of $Cd_{1-x}Be_xSe$ mixed crystals' International Journal of Thermophysics USA 26(1), (2005), 285-293.
- [1.13] M.Pawlak, J.Gibkes, J.L.Fotsing, J.Zakrzewski, M.Maliński, B.K.Bein, J.Pelzl 'Study of optical properties of $Zn_{1-x}Be_xTe$ mixed crystals by means of combined IR radiometry and photoacoustics' J.de Physique IV France 117, 47-56 (2004).
- [1.14] L.Bychto, M.Maliński '1D or 3D spatial distribution-comparison' J.de Physique IV France 117, 17-23 (2004).
- [1.15] M.Maliński, J.Zakrzewski, S.Łęgowski, H.Męczyńska 'The analysis of the piezoelectric photothermal spectra of $Cd_{1-x}Mn_xTe$ mixed crystals' Int. J.of Thermophysics USA 26(1), (2005), 255-268.

- [1.16] A.A.Memon, M.Maliński, A.Fukuyama, T.Ikari 'Effect of surface states on piezoelectric photothermal spectra of silicon single crystals' *Jpn. J. of Appl. Physics* 43, No.5a, 2397-2401, (2004).
- [2.1] Ł.Chrobak, M.Maliński, A.Patryn 'Theoretical and experimental studies of a plasma wave contribution to the photoacoustic signal for Si samples' *Acta Acustica United with Acustica* – V.95, 60-64, (2009).
- [2.2] M.Maliński, L.Bychto 'Influence of plasma waves on the photoacoustic and piezoelectric spectra of semiconductors' *Journal de Physique IV France* 129, 2005, 237-239.
- [2.3] L.Bychto, M.Maliński 'Comparison of plasma waves models in photoacoustics' *Journal de Physique IV France* 129, (2005), 213-216.
- [3.1] D. M. Todorović, J. Zakrzewski, M. Maliński, T. Grozdić, F. Firszt 'Photoacoustic spectra of $Zn_{1-x}Be_xTe$ near the energy gap' *European Physical Journal –Special Topics* **153**, 263-266 (2008).
- [3.2] M. Maliński, J. Zakrzewski, F. Firszt 'Photoacoustic spectroscopy of surface defects states of semiconductor samples' *European Physical Journal-Special Topics* **153**, 267-270 (2008)
- [4.1] M. Maliński – 'Application of the temperature distribution formula for the photoacoustic investigations of layer systems' *European Physical Journal-Special Topics* **153**, 291-293 (2008).
- [4.2] M. Maliński, L.Bychto, J.L.Nzodoum Fotsing, K.Junge, A.Patryn 'The model of a thin semiconductor layer on a thermally thick semiconductor backing' *J.de Physique France* 117, 29-40, (2004).
- [5.1] L.Bychto, M.Maliński, 'Thermoacoustic Investigations of Air Tightness of Electronic Devices' *Acta Acustica United With Acustica* V.92, 2006, 482-487.
- [5.2] L.Majchrzak, M.Maliński 'Analysis of a thermoacoustic approach for the evaluation of hermeticity of packagings of electronic devices' XXIX International Conference of IMAPS Poland Chapter Koszalin, Darłówko, September 2005, 413-416, (2005).
- [5.3] M.Maliński 'Determination of air-tightness of the packagings of electronic devices by the thermoacoustic method' *Archives of Acoustics* 30(2), 147-157 (2005).
- [5.4] M.Maliński 'Application of the thermoacoustic method for the determination of air-tightness of the packagings of electronic devices' *Acta Acustica united with Acustica* 91, 372-377 (2005).
- [6.1] J.Zakrzewski, M.Maliński, M.Pawlak, F.Firszt, S.Łęgowski, H.Męczyńska, K.Strzałkowski 'Determination of the thermophysical parameters of $Zn_{1-x}Be_xSe$ mixed crystals by means of photothermal techniques' *Phys. Stat. sol. (c)* 3, No.4, (2006), 746-749.

- [6.2] M.Maliński, L.Bychto, A.Patryn, J.Gibkes, J.Bein, J.Pelzl 'Investigations of the optical and thermal parameters of porous silicon layers with the two wavelength photoacoustic method' Journal de Physique IV France 129, (2005), 241-243.
- [7.1] M.Maliński, L.Bychto, J.Zakrzewski 'Determination of a quantum efficiency of AII-BVI compounds on the basis of photoacoustic spectra' Journal de Physique IV France 129, (2005), 245-248.
- [7.2] M.Maliński 'Frequency characteristics: a source of information in photoacoustics' International SPIE Congress on Optics and Optoelectronics September 2005 Warsaw- invited paper, Proc. SPIE Optics and Optoelectronics Congress Warsaw V.5953,2005,7-16.
- [7.3] M.Maliński 'Applications of thermoacoustic techniques for thermal, optical and mechanical characterization of materials, structures and devices' XXIX International Conference of IMAPS Poland Chapter Koszalin Darłówko September 2005, 77-84, (2005) –invited paper.

Applications of the photoacoustic method in the research of the parameters of the optical and recombinant semiconductor materials