Zastosowania wybranych metod nieniszczących opartych na falach termicznych i plazmowych w badaniach właściwości optycznych, termicznych i rekombinacyjnych materiałów elektronicznych i warstw implantowanych

dr inż. Ł. B. CHROBAK

Katedra Elektroniki WEiI

Politechnika Koszalińska

Plan prezentacji

1. Wprowadzenie
2. Wykorzystane techniki pomiarowe
3. Omówienie otrzymanych wyników
4. Podsumowanie
5. Skrócone zestawienie działalności naukowej

1.1 Wprowadzenie

Przewodnim celem badań była charakteryzacja materiałów półprzewodnikowych w oparciu o wybrane techniki nieniszczące oraz zwiększenie ich poprawności stosowania jak i skuteczności.

Zastosowane metody badawcze:

- metoda fotoakustyczna (ang. **PA** – Photo Acoustic)
- metoda modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych (ang. **MFCA** – Modulated Free Carriers Absorption)
- metoda radiometrii w podczerwieni (ang. **PTR** – Photo Thermal Radiometry)

Badania przeprowadzono na grupie półprzewodników: Si, SiGe oraz wybranych związków mieszanych AII-BVI.

1.2 Tytuł osiągnięcia naukowego

Monotematyczny cykl wybranych **11 publikacji** pod wspólnym tytułem:

„*Zastosowania wybranych metod nieniszczących opartych na falach termicznych i plazmowych w badaniach właściwości optycznych, termicznych i rekombinacyjnych materiałów elektronicznych i warstw implantowanych jonowo*”

1.3 Cykl publikacji

[H1] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, „Comparison of three nondestructive and contactless techniques for investigations of recombination parameters on an example of silicon samples”, Infrared Physics & Technology 91, (**2018**), 1–7. **MNiSW=25 IF=1.851**

[H2] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, J. Zakrzewski, „Photoacoustic spectroscopic investigations of optical and thermal properties of diluted magnetic CdBeMnTe crystals”, Materials Science in Semiconductor Processing 38, (**2015**), 87-92. **MNiSW=25 IF=2.264**

[H3] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, J. Zakrzewski, „Simultaneous determination of the thermal diffusivity and a drum factor for CdBeMnTe crystals with the photoacoustic method”, Thermochimica Acta 606, (**2015**), 84-89. **MNiSW=25 IF=1.938**

[H4] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, J. Zakrzewski, „The method of distinguishing the drum from the plasma wave effect in the photoacoustic spectra on the example of CdSe and CdMgSe crystals”, Thermochimica Acta 641, (**2016**), 79-84. **MNiSW=30 IF=2.236**

[H5] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, „Badania wybranych materiałów optoelektronicznych z wykorzystaniem fototermicznej radiometrii w podczerwieni”, Przegląd Elektrotechniczny 92(9), (2016), 122-124. **MNiSW=14**

[H6] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, „Investigations of the possibility of determination of thermal parameters of Si and SiGe samples based on the Photo Thermal Radiometry technique”, Infrared Physics & Technology 89, (**2018**), 46–51. **MNiSW=25 IF=1.851**

1.3 Cykl publikacji

[H7] 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. **MNiSW=14**

[H8] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, “Obrazowanie obszarów implantowanych w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki radiometrii w podczerwieni”, Przegląd Elektrotechniczny 93(8), (**2017**), 92-94. **MNiSW=14**

[H9] **Ł. Chrobak**, M. Maliński, M. Pawlak, “Measurements of the optical absorption coefficient of Ar^{+8} ion implanted silicon layers using the photothermal radiometry and the modulated free carrier absorption methods”, Infrared Physics & Technology 67, (**2014**), 604–608. **MNiSW=25 IF=1.550**

[H10] 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”, Applied Physics A - Materials Science & Processing 118(3), (**2015**), 1009-1014. **MNiSW=25 IF=1.444**

[H11] **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. **MNiSW=35 IF=2.320**

1.4 Autorski wkład do dyscypliny

Istotny autorski wkład do nauki w obszarze dyscypliny elektronika przedstawionego osiągnięcia obejmuje:

1) Wyznaczenie wybranych parametrów termicznych i optycznych kryształów CdTe i CdBeMnTe z wykorzystaniem spektroskopii fotoakustycznej oraz zaproponowanie poprawki modelowej uwzględniającej wpływ komory na badany sygnał fotoakustyczny

2) Wyznaczenie parametrów termicznych kryształów CdBeMnTe z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości z uwzględnieniem czynnika membranowego

3) Opracowanie metody mającej na celu odróżnienie czynnika plazmowego od czynnika membranowego, które wchodzą w skład sygnału fotoakustycznego, umożliwiającej przeprowadzenie prawidłowej interpretacji wyników badań czasu życia nośników w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości

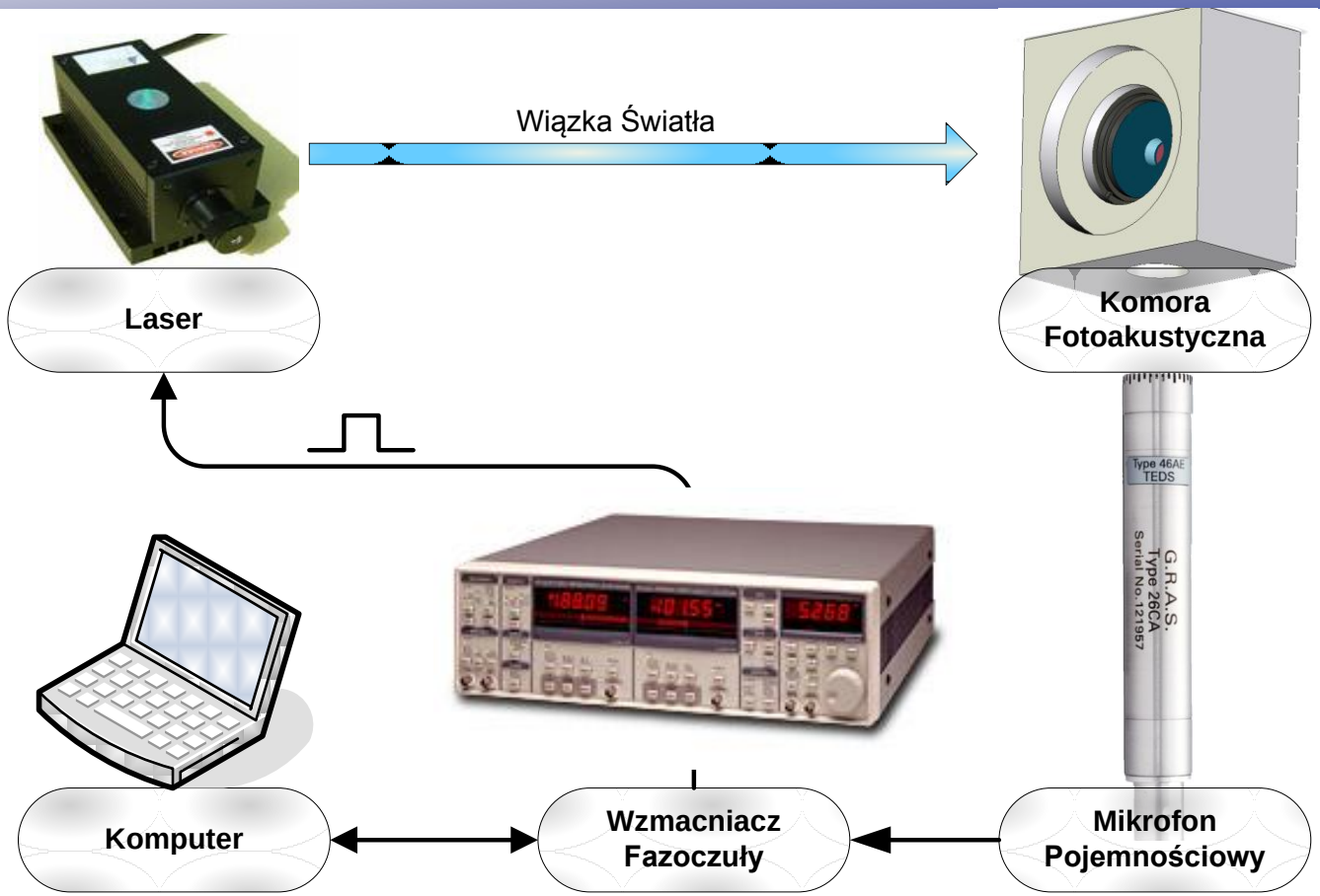
1.4 Autorski wkład do dyscypliny

4) Zaproponowanie modeli uproszczonych sygnału PTR oraz opracowanie metody wyznaczania wybranych parametrów termicznych i rekombinacyjnych kryształów SiGe z wykorzystaniem radiometrii w podczerwieni

5) Opracowanie procedury umożliwiającej wyznaczanie rozkładu powierzchniowego koncentracji pułapek w płytkach krzemowych z rozkładów powierzchniowych czasu życia nośników uzyskanych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych

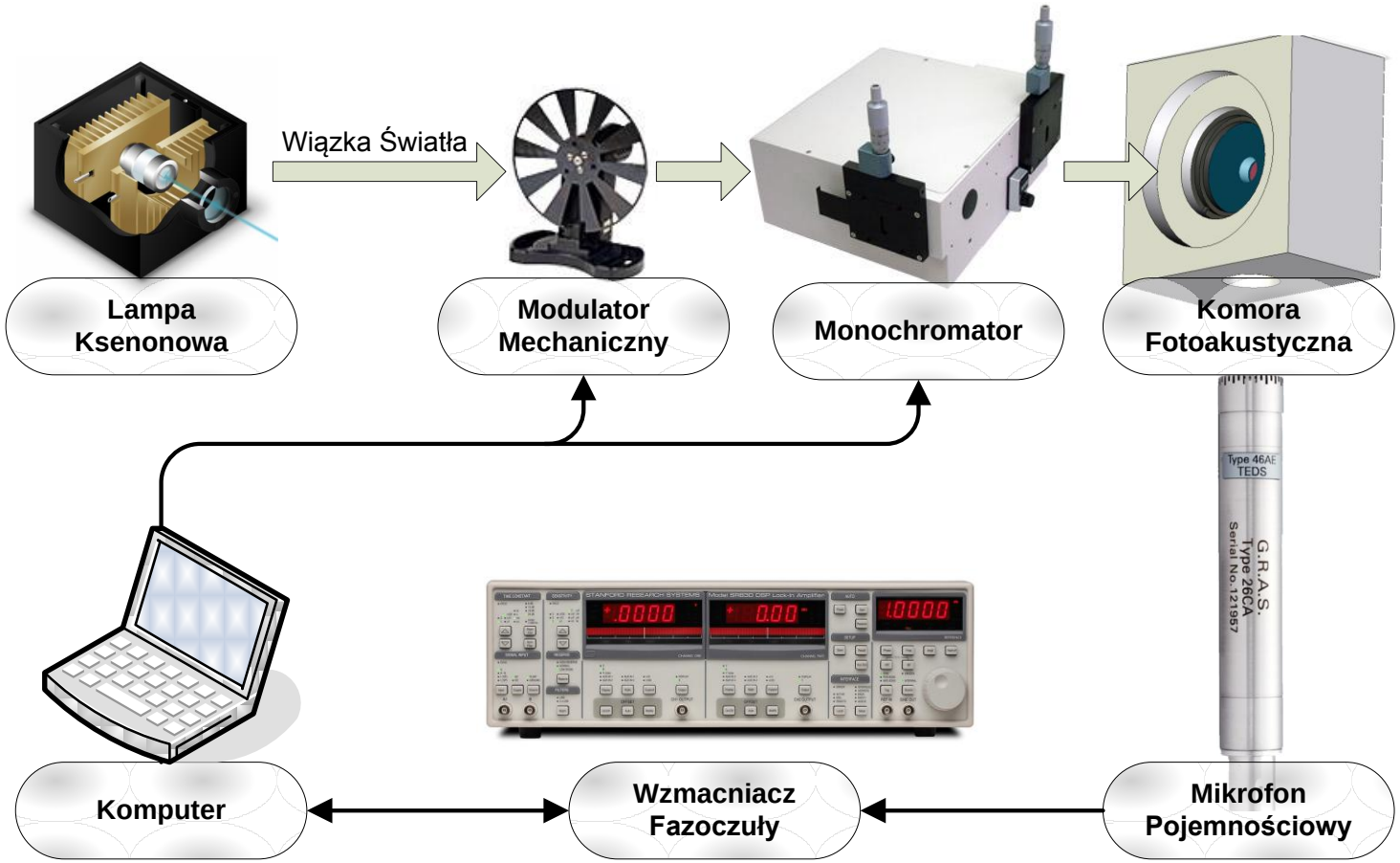
6) Zobrazowanie obszarów implantowanych jonowo w krzemie z wykorzystaniem technik MFCA i PTR, wyznaczenie zmian parametrów rekombinacyjnych i optycznych w krzemie, będących rezultatem implantacji jonowej, opracowanie modelu uproszczonego umożliwiającego wyznaczenie współczynnika absorpcji optycznej warstw implantowanych

2.1 Metoda fotoakustyczna (PA)



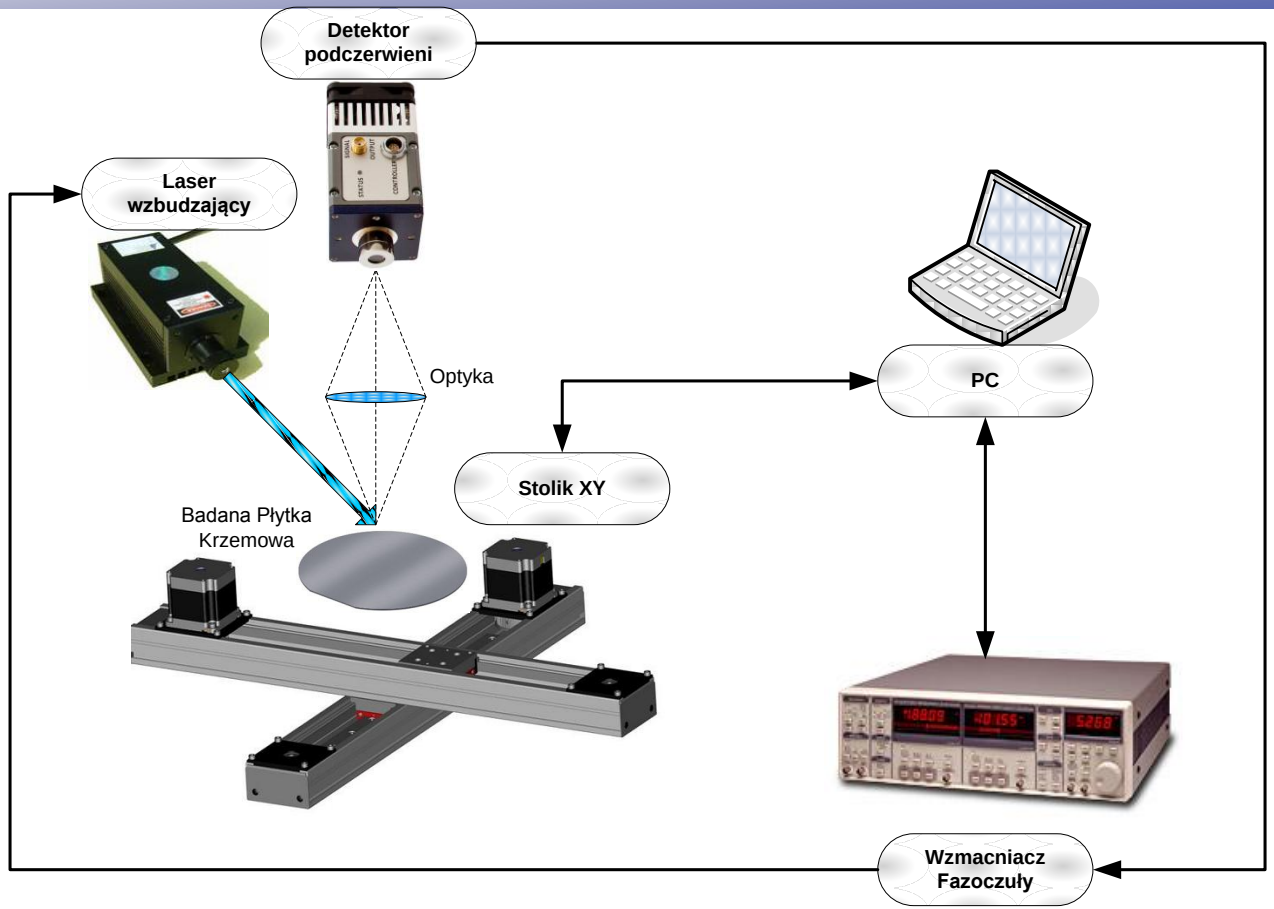
Rys.1. Schemat poglądowy autorskiego stanowiska do badań z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości.

2.1 Metoda fotoakustyczna (PA)



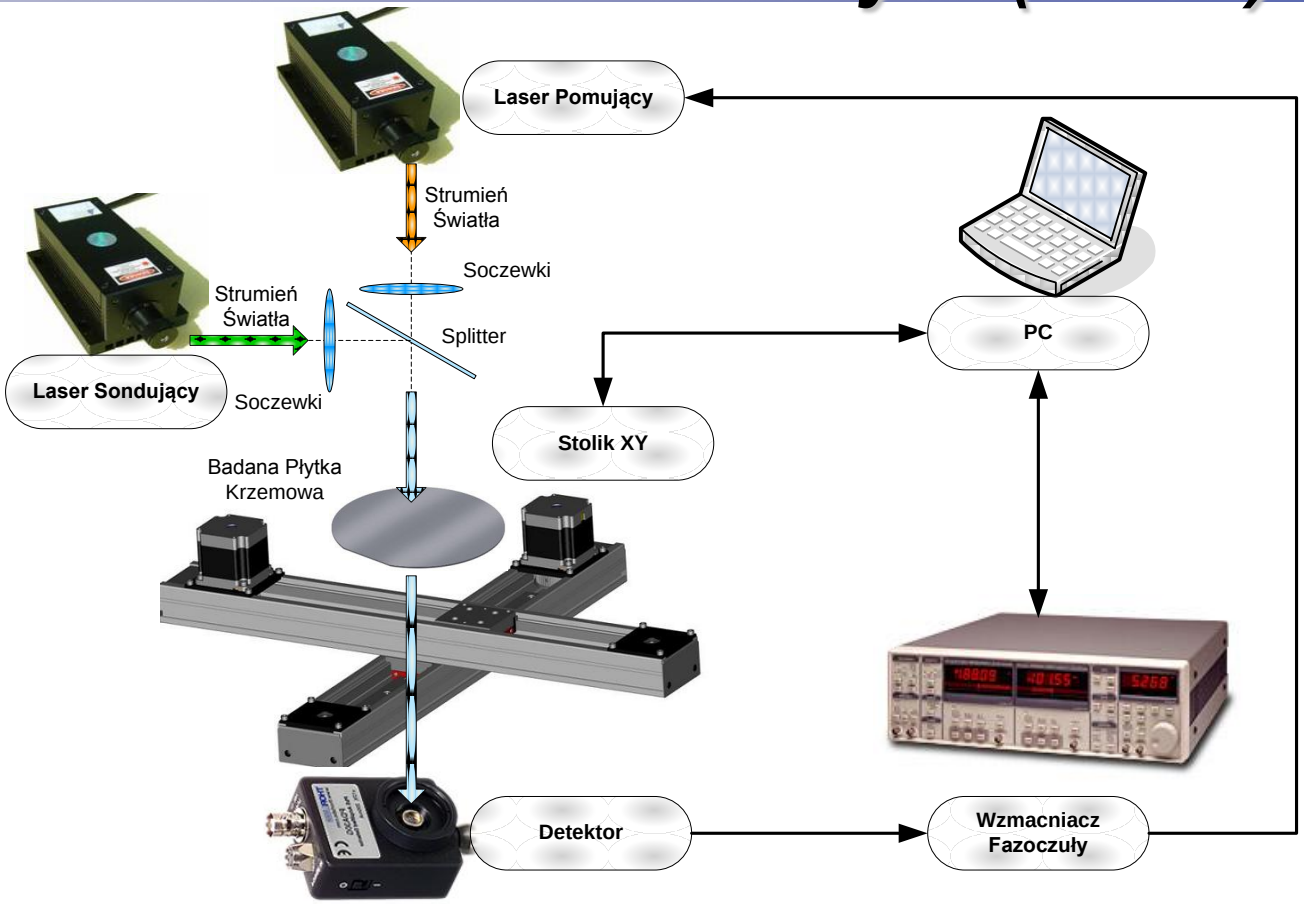
Rys.2. Schemat poglądowy autorskiego stanowiska do badań z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie długości fali.

2.2 Radiometria w podczerwieni (PTR)



Rys.3. Schemat poglądowy autorskiego stanowiska do badań z wykorzystaniem radiometrii w podczerwieni w dziedzinie częstotliwości i położenia wiązki laserowej.

2.3 Metoda modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych (MFCA)

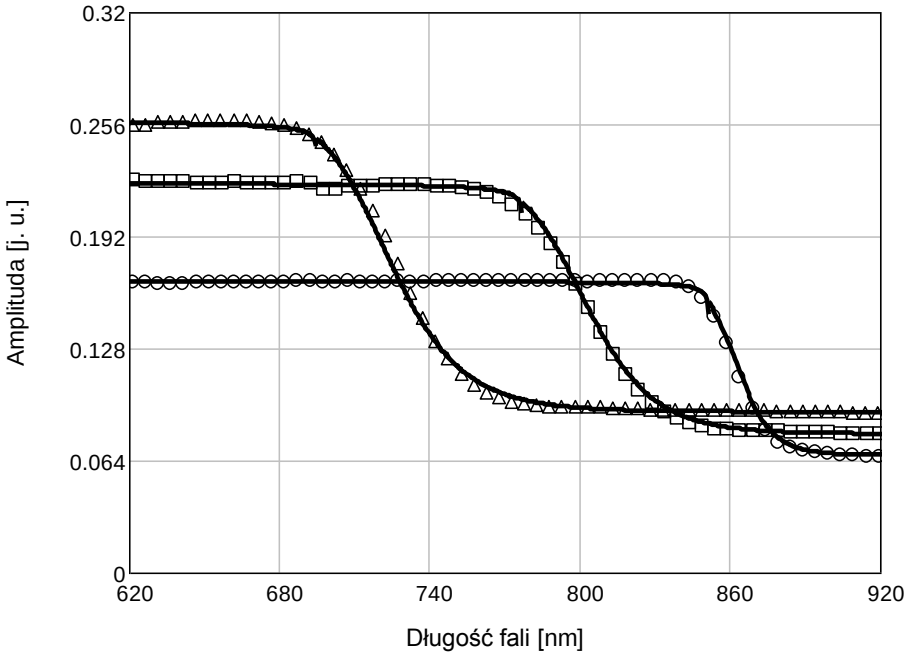


Rys.4. Schemat poglądowy autorskiego stanowiska do badań z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych w dziedzinie częstotliwości i położenia wiązki laserowej.

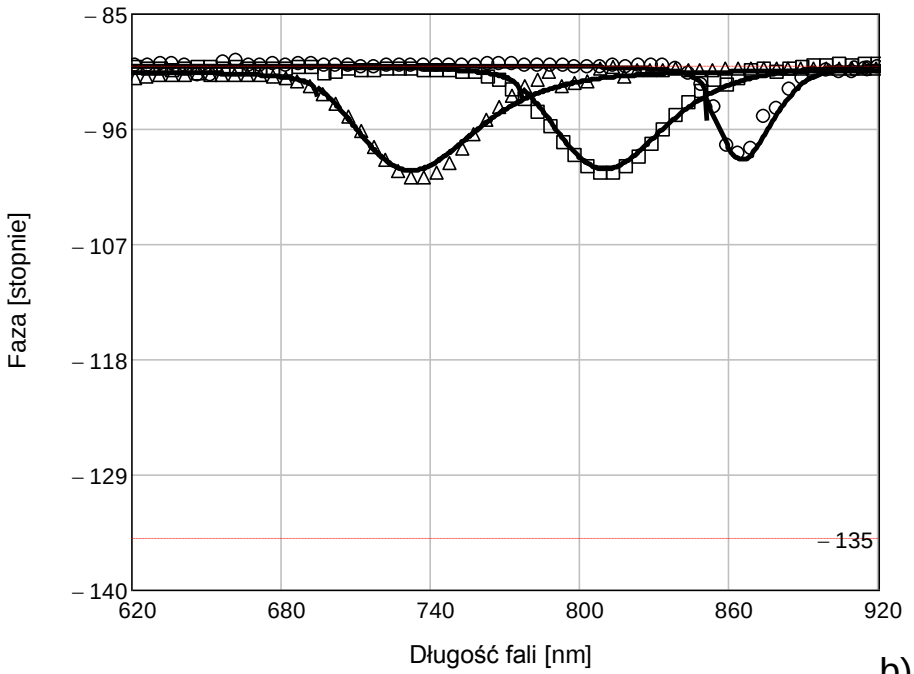
3.1 Badania kryształów CdTe i CdBeMnTe

Wyznaczenie wybranych parametrów termicznych i optycznych kryształów CdTe i CdBeMnTe z wykorzystaniem spektroskopii fotoakustycznej oraz zaproponowanie poprawki modelowej uwzględniającej wpływ komory na badany sygnał fotoakustyczny

3.1 Badania kryształów CdTe i CdBeMnTe



a)



b)

Rys.5. Fotoakustyczne widma amplitudowe (a) i fazowe (b) kryształów CdTe (kółka), $Cd_{0.85}Be_{0.05}Mn_{0.10}Te$ (kwadraty) i $Cd_{0.80}Be_{0.10}Mn_{0.10}Te$ (trójkąty), według [**H2**]. Linie ciągłe to krzywe teoretyczne otrzymane z najlepszego dopasowania charakterystyk teoretycznych do danych eksperymentalnych <u>z uwzględnieniem zmian</u> wprowadzanych przez komorę fotoakustyczną.

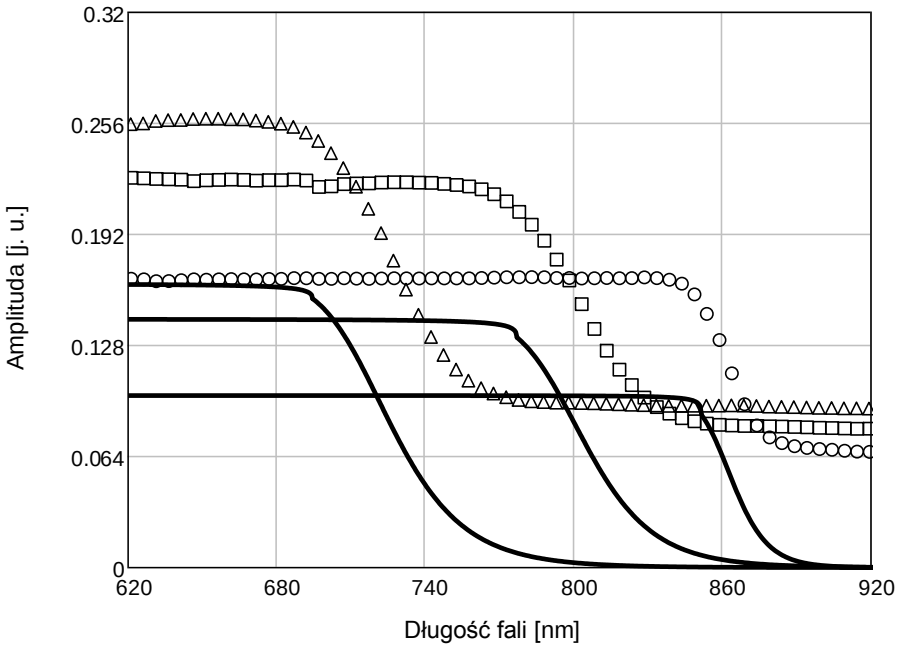
3.1 Badania kryształów CdTe i CdBeMnTe

Wyrażenia na sygnał PA z uwzględnieniem poprawki na komorę:

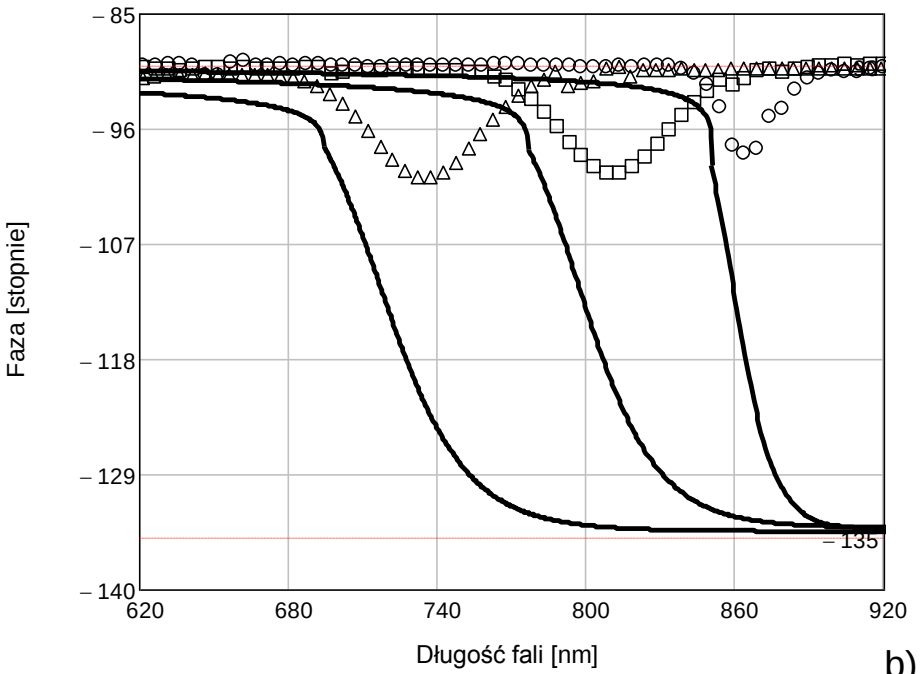
$$Amp(0, f, \lambda, \alpha, \beta, d) = \left| \frac{T(0, f, \lambda, \alpha, \beta, d) + \varepsilon \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right)}{\sigma(f, \alpha)} \right|$$

$$Ph(0, f, \lambda, \alpha, \beta, d) = \frac{180}{\pi} \cdot \arg\left[\frac{T(0, f, \lambda, \alpha, \beta, d) + \varepsilon \exp\left(-i\frac{\pi}{4}\right)}{\sigma(f, \alpha)} \right]$$

3.1 Badania kryształów CdTe i CdBeMnTe



a)



b)

Rys.6. Fotoakustyczne widma amplitudowe (a) i fazowe (b) kryształów CdTe (kółka), $Cd_{0.85}Be_{0.05}Mn_{0.10}Te$ (kwadraty) i $Cd_{0.80}Be_{0.10}Mn_{0.10}Te$ (trójkąty), według [**H2**].
Linie ciągłe to krzywe uzyskane <u>po odjęciu sygnału</u> pochodzącego od komory fotoakustycznej.

3.1 Badania kryształów CdTe i CdBeMnTe

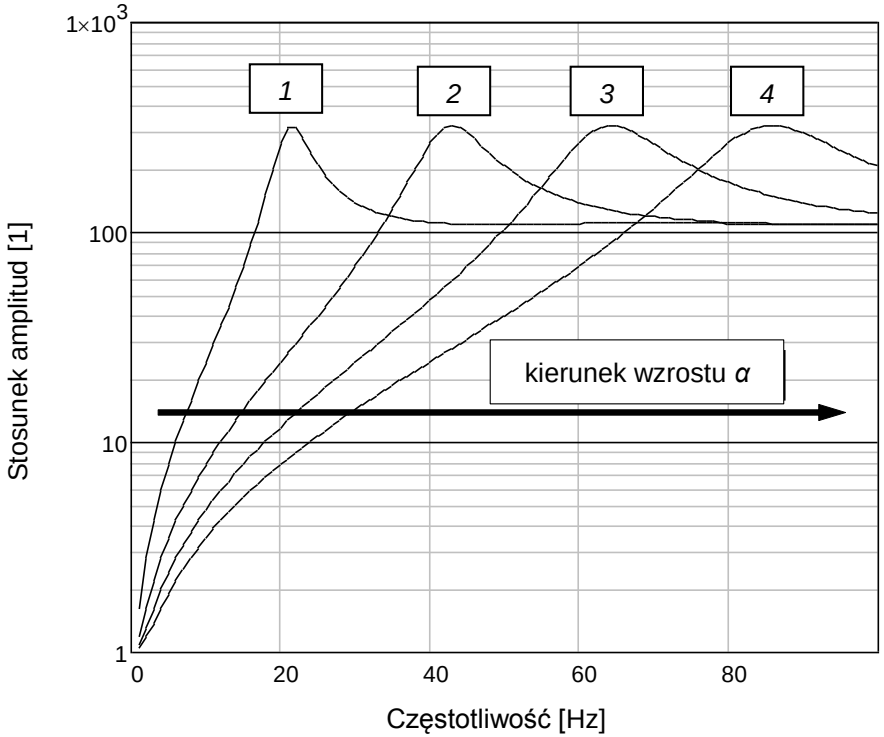
Tab.1. Wartości parametrów zbadanych próbek uzyskanych z pomiarów fotoakustycznych, według [**H2**].

Próbka	CdTe	$Cd_{0.85}Be_{0.05}Mn_{0.10}Te$	$Cd_{0.80}Be_{0.10}Mn_{0.10}Te$
Grubość (d) [cm]	0.110	0.105	0.100
Dyfuzyjność termiczna (α) [cm^2/s]	0.0515	0.0417	0.0289
Przerwa energetyczna (E_g) [eV]	1.460	1.595	1.790
Czynnik Urbacha (β_u) [cm^{-1}]	190	220	370
Współczynnik ogonu Urbacha (γ) [a. u.]	1.0	0.8	0.6
Czynnik absorpcji (A) [$cm^{-1}/eV^{1/2}$]	2850	1850	1650
Współczynnik komory (ε) [a. u.]	0.0115	0.0077	0.00635

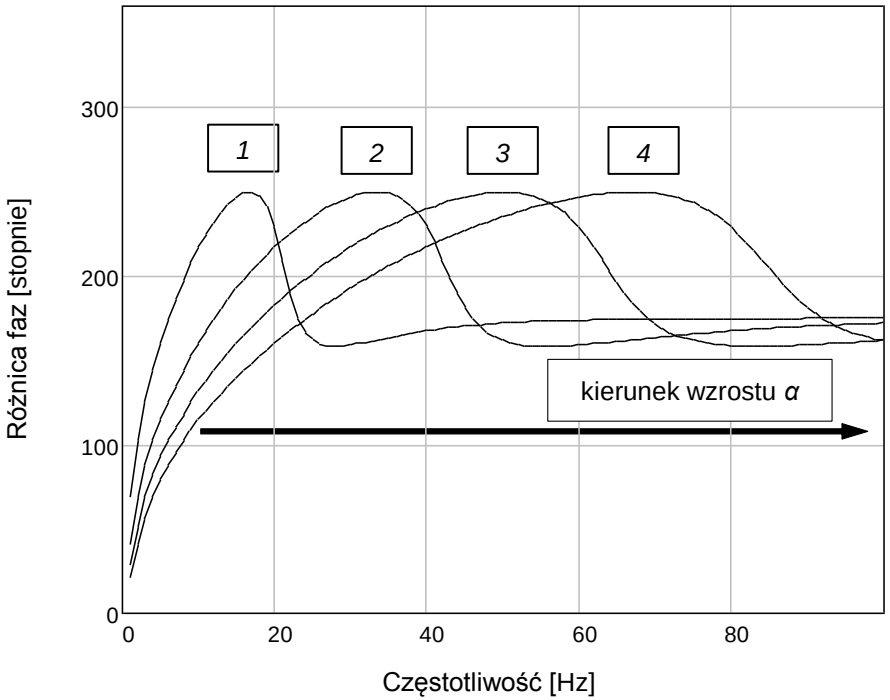
3.2 Badania kryształów CdBeMnTe

Wyznaczenie parametrów termicznych kryształów CdBeMnTe z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości z uwzględnieniem czynnika membranowego

3.2 Badania kryształów CdBeMnTe



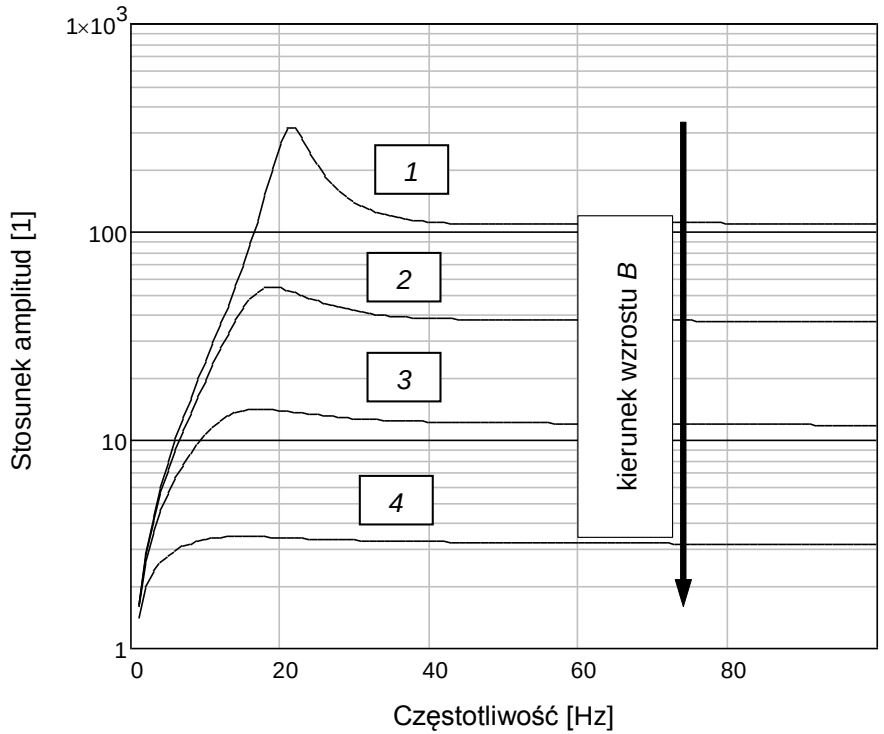
a)



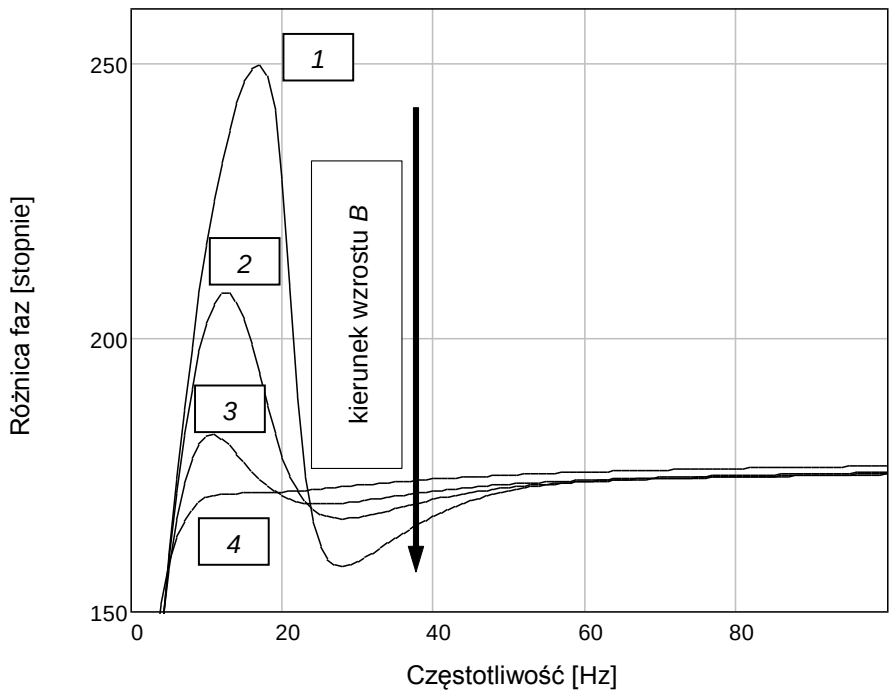
b)

Rys.7. Teoretyczne fotoakustyczne charakterystyki amplitudowe Sf/Sr (a) oraz fazowe Phase-Lag (b) policzone dla różnych wartości dyfuzyjności termicznej, według [**H3**]: (1) 0.02 cm^2/s, (2) 0.04 cm^2/s, (3) 0.06 cm^2/s, (4) 0.08 cm^2/s. Pozostałe wartości parametrów wziętych do obliczeń były następujące: d=0.1 cm, B=0.2 cm-1.

3.2 Badania kryształów CdBeMnTe



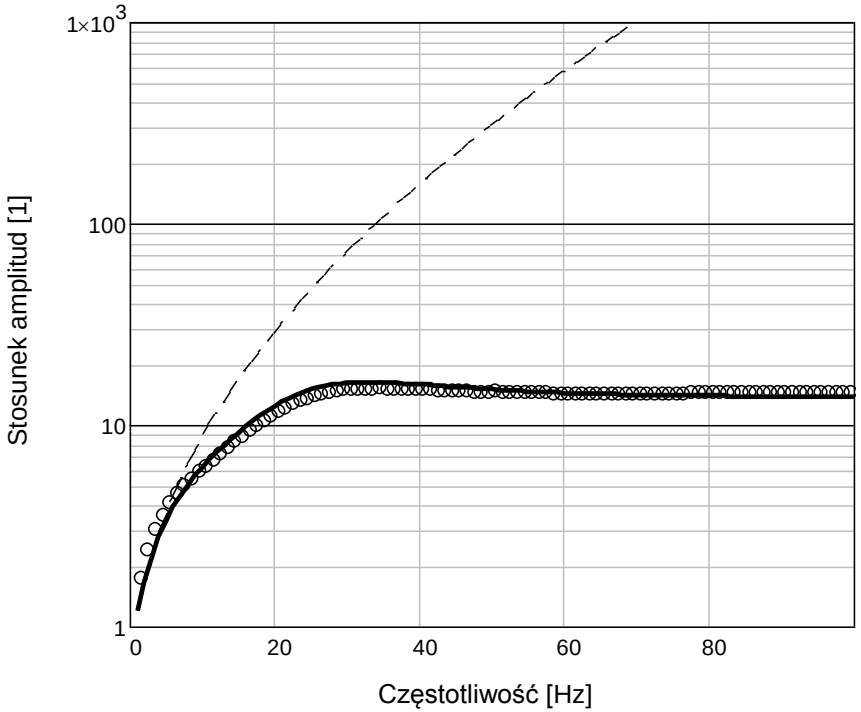
a)



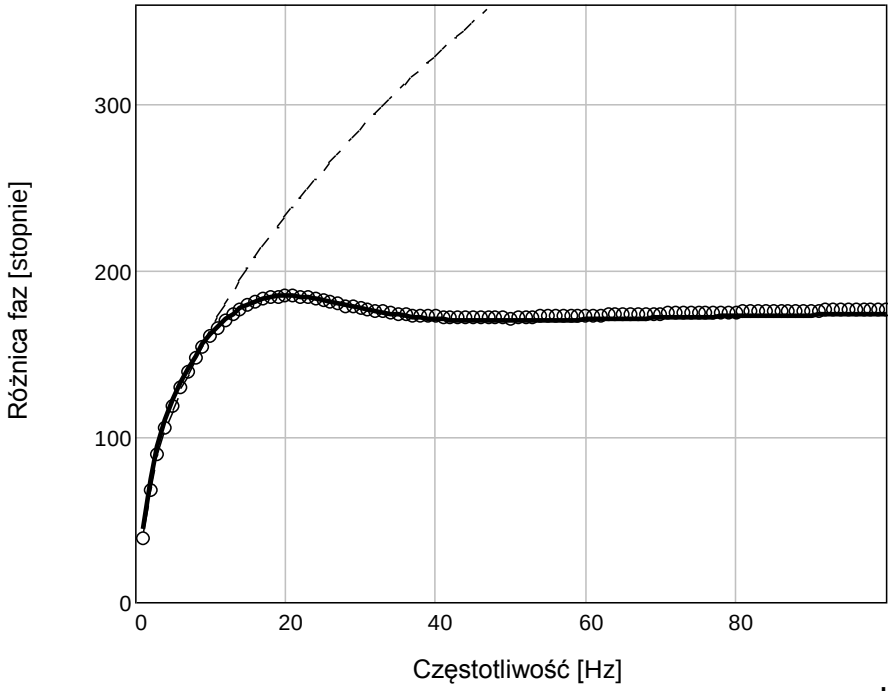
b)

Rys.8. Teoretyczne fotoakustyczne charakterystyki amplitudowe Sf/Sr (a) oraz fazowe Phase-Lag (b) policzone dla różnych wartości współczynnika membranowego *B*, według [**H3**]: (1) 0.2 cm^{-1}, (2) 0.6 cm^{-1}, (3) 2 cm^{-1}, (4) 10 cm^{-1}. Pozostałe wartości parametrów wziętych do obliczeń były następujące: *d*=0.1 cm.

3.2 Badania kryształów CdBeMnTe



a)



b)

Rys.9. Teoretyczne i eksperymentalne fotoakustyczne charakterystyki amplitudowe Sf/Sr i fazowe Phase-Lag zmierzone dla próbki $Cd_{0.8}Be_{0.05}Mn_{0.10}Te$, według [**H3**].
Kółka – wyniki eksperymentalne, cienka linia przerywana – charakterystyka teoretyczna bez uwzględnienia efektu membranowego, gruba linia ciągła - charakterystyka teoretyczna z uwzględnieniem efektu membranowego.

3.2 Badania kryształów CdBeMnTe

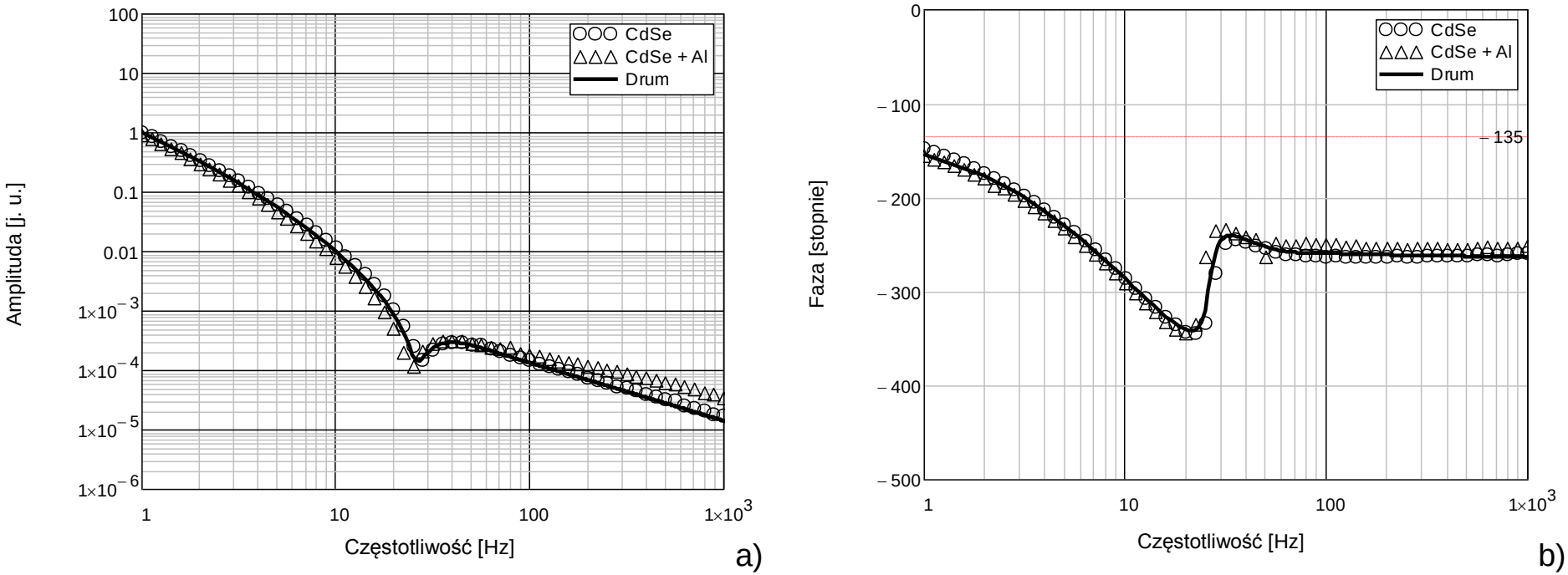
Tab.2. Wartości dyfuzyjności termicznej i czynnika membranowego uzyskane z pomiarów fotoakustycznych dla zbadanych próbek, według [**H3**].

Próbka	Dyfuzyjność termiczna [cm^2/s] *A*	Czynnik membranowy [cm^{-1}] *B*	Grubość [cm] *d*
CdTe	0.0515 ± 15%	0.565	0.110
$Cd_{0.85}Be_{0.05}Mn_{0.10}Te$	0.0417 ± 15%	1.65	0.105
$Cd_{0.75}Be_{0.15}Mn_{0.10}Te$	0.0146 ± 15%	8.74	0.095

3.3 Badania kryształów CdSe

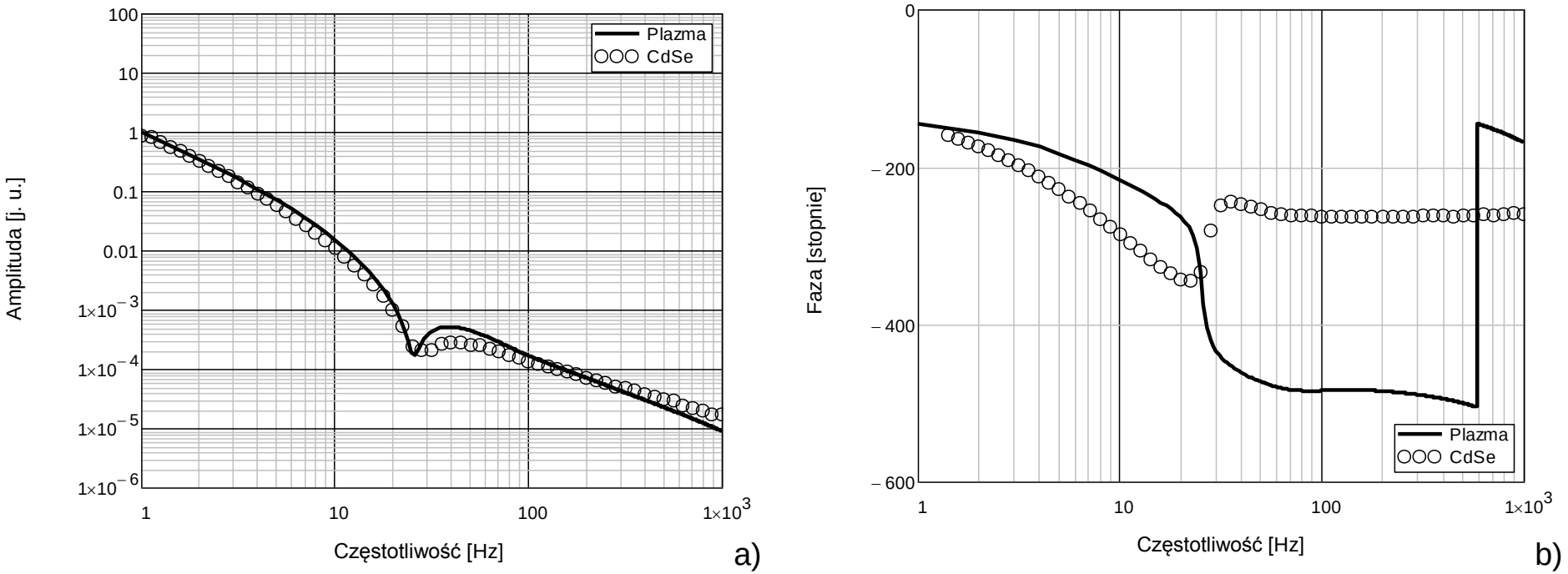
Opracowanie metody mającej na celu odróżnienie czynnika plazmowego od czynnika membranowego, które wchodzą w skład sygnału fotoakustycznego, umożliwiającej przeprowadzenie prawidłowej interpretacji wyników badań materiałów półprzewodnikowych z wykorzystaniem metody fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości

3.3 Badania kryształów CdSe



Rys.10. Teoretyczne i eksperymentalne fotoakustyczne charakterystyki amplitudowe (a) i fazowe (b) uzyskane dla zbadanych próbek CdSe, według [**H4**].
Linia ciągła – charakterystyka teoretyczna obliczona w modelu uwzględniającym czynnik membranowy.

3.3 Badania kryształów CdSe



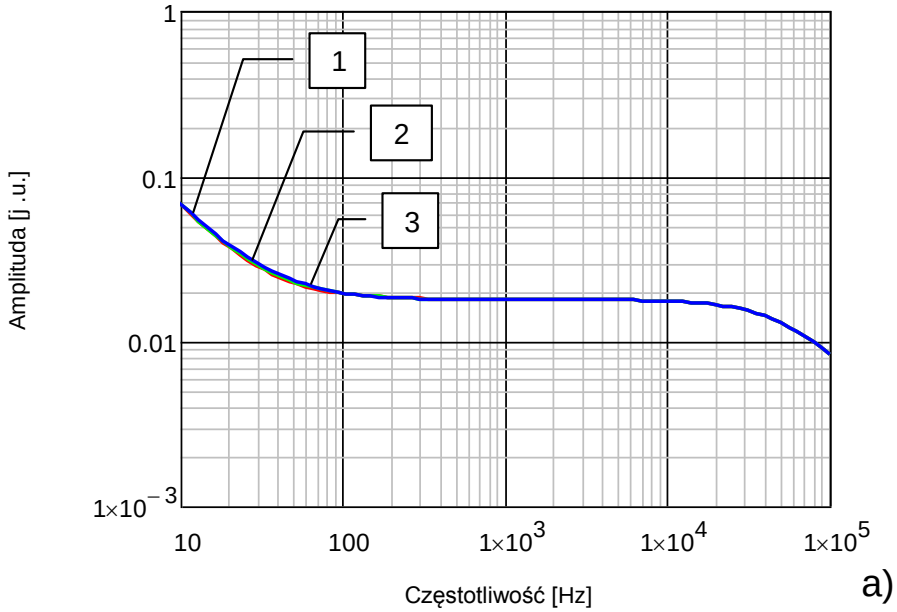
Rys.11. Teoretyczne i eksperymentalne fotoakustyczne charakterystyki amplitudowe (a) i fazowe (b) uzyskane dla zbadanych próbek CdSe, według [**H4**].
Linia ciągła – charakterystyka teoretyczna obliczona w modelu uwzględniającym fale plazmowe.

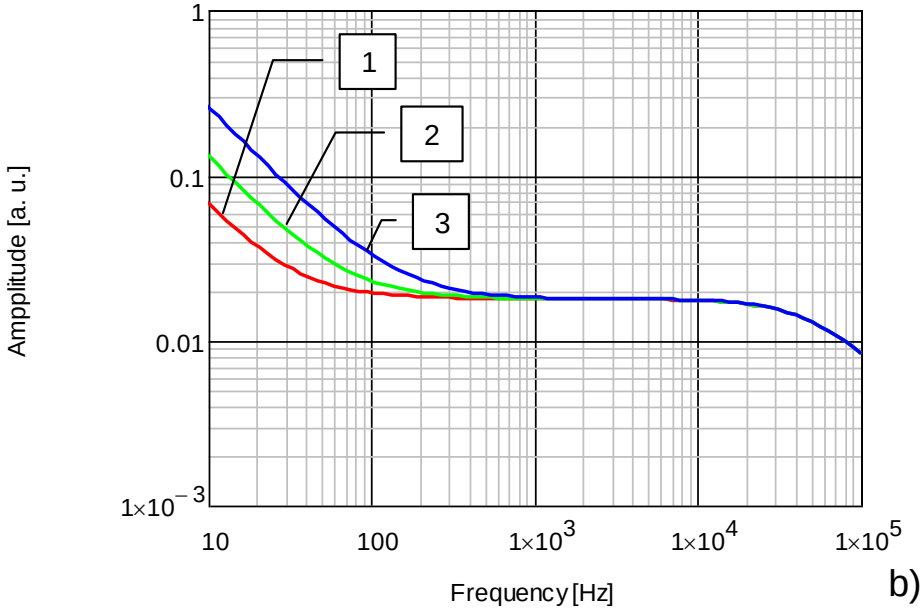
Wniosek: Dopiero analiza charakterystyk fazowych pozwala odróżnić efekt plazmowy od efektu membranowego i poprawnie wyznaczyć czas życia nośników

3.3 Badania kryształów SiGe

Zaproponowanie modeli uproszczonych sygnału PTR oraz opracowanie metody wyznaczania wybranych parametrów termicznych i rekombinacyjnych kryształów SiGe z wykorzystaniem fotoatermicznej radiometrii w podczerwieni

3.3 Badania kryształów SiGe





Rys.12a. Teoretyczne charakterystyki amplitudowe sygnału PTR obliczone dla różnych wartości przewodnictwa cieplnego i dyfuzyjności termicznej (a), według [**H6**]. Ch-ka 1 – (λ, α), ch-ka 2 – ($\lambda/2$, $\alpha/2$), ch-ka 3 – ($\lambda/4$, $\alpha/4$).

Rys.12b. Teoretyczne charakterystyki amplitudowe sygnału PTR obliczone dla różnych wartości przewodnictwa cieplnego (b), według [**H6**]. Ch-ka 1 – (λ, α), ch-ka 2 – ($\lambda/2$, α), ch-ka 3 – ($\lambda/4$, α).

3.3 Badania kryształów SiGe

1) W celu dopasowania charakterystyki teoretycznej do eksperymentalnej wymagane jest wyznaczenie parametru K_1 dla próbki referencyjnej

$$PTR_{exp(Si)} = K_1 \left[T_c\left(\lambda_{Si}, \alpha_{Si}\right)_{th} + \frac{1}{A} P_c\left(\tau_{Si}\right)_{th} \right] = K_1\, PTR_{th(Si)}$$

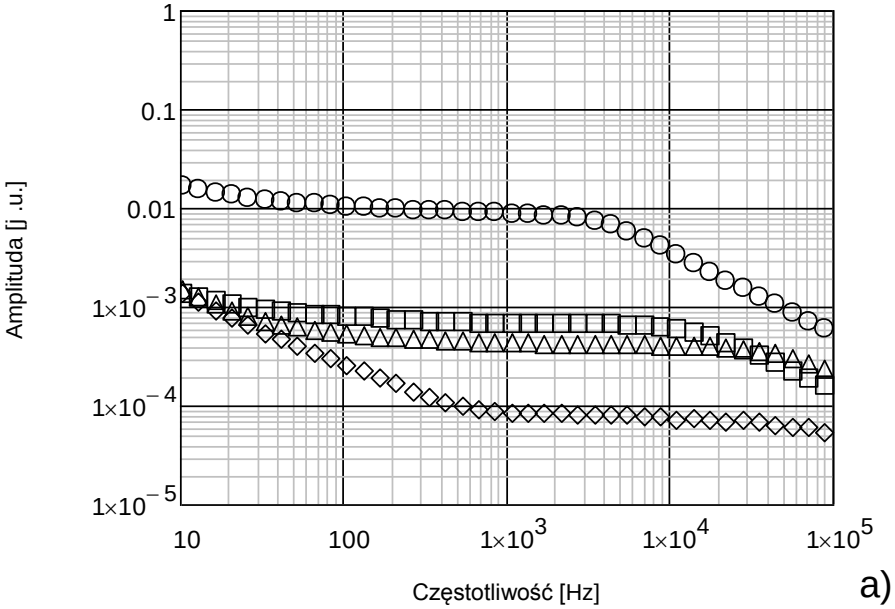
2) Jeżeli τ_s jest czasem życia nośników badanej próbki oraz τ_{Si} jest czasem życia nośników referencyjnej próbki krzemowej, to wtedy:

$$PTR_{exp(s)} = K_1 \left[T_c\left(\lambda_s, \alpha_s\right)_{th} + \frac{K_2}{A} P_c\left(\tau_s\right)_{th} \right] = K_1\, PTR_{th(s)}$$

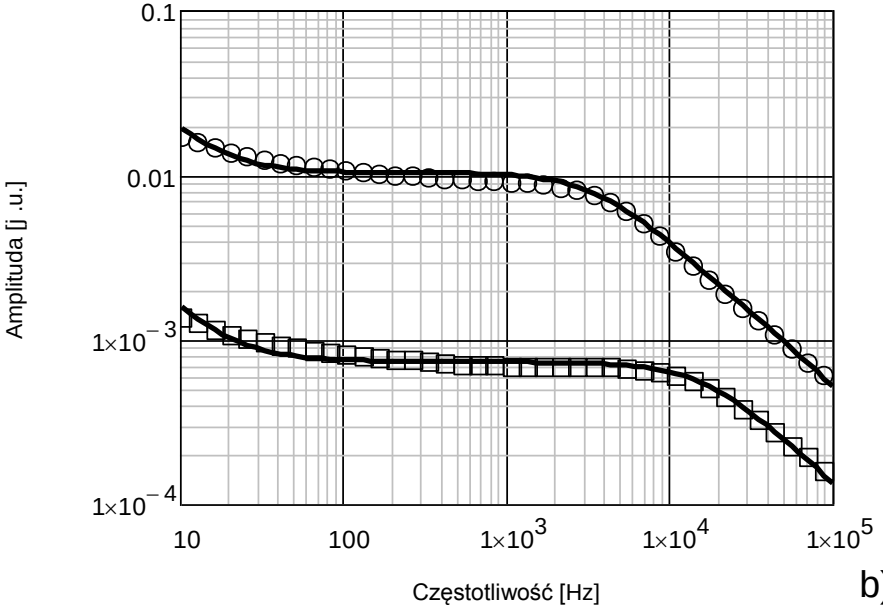
Parametr K_2 jest wyznaczony na podstawie dopasowania poziomu amplitudowej charakterystyki teoretycznej (dla czasu życia nośników τ_s wyznaczonego z częstotliwości kolankowej) do poziomu amplitudy doświadczalnej w zakresie większym niż 1 kHz.

3) Wartość przewodnictwa cieplnego musi zostać podstawiona do zależności T_c, co umożliwia wyznaczenie wartości dyfuzyjności termicznej α_s z dopasowania charakterystyki teoretycznej sygnału PTR do charakterystyki eksperymentalnej otrzymanej dla zbadanej próbki.

3.3 Badania kryształów SiGe



a)



b)

Rys.13a. Eksperymentalne charakterystyki amplitudowe sygnału PTR, według [**H6**] (kółka - próbka wzorcowa krzemu, kwadraty – $Si_{0.987}Ge_{0.013}$, trójkąty – $Si_{0.955}Ge_{0.045}$, diamenty – $Si_{0.943}Ge_{0.057}$).

Rys.13b. Charakterystyki amplitudowe eksperymentalne (kółka – krzem, kwadraty – próbka $Si_{0.987}Ge_{0.013}$) i teoretyczne (linie ciągłe) sygnału PTR, według [**H6**].

3.3 Badania kryształów SiGe

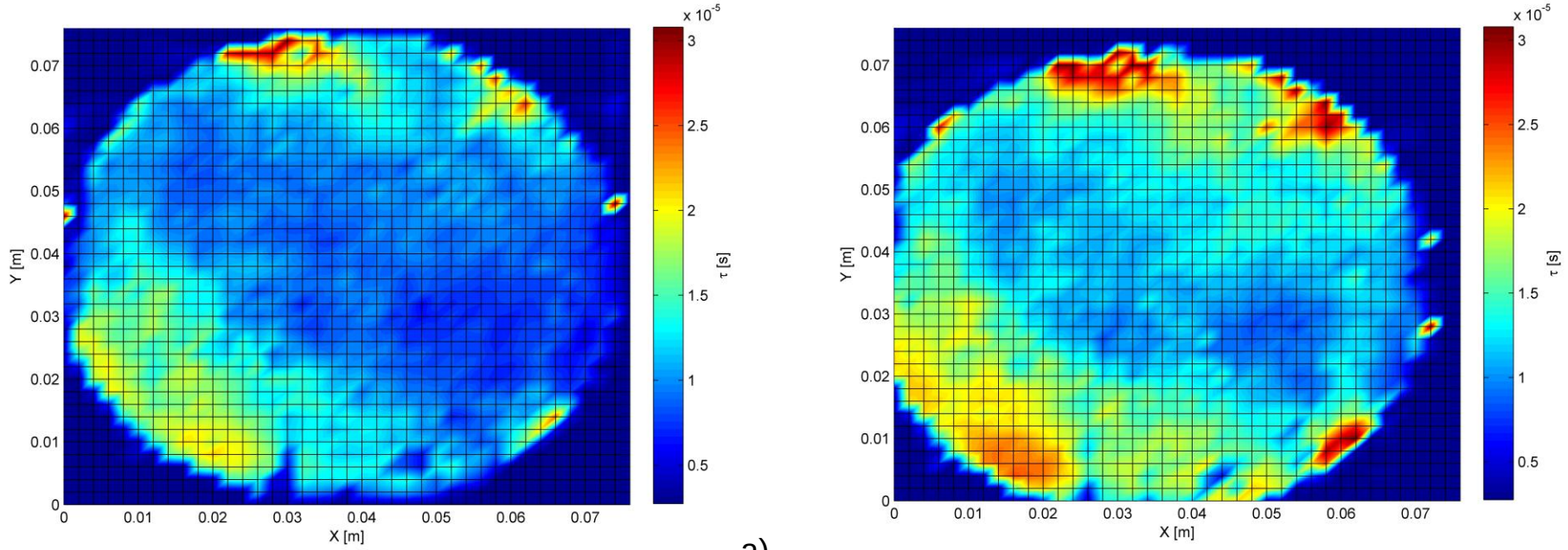
Tab.2. Wyznaczone wartości parametrów termicznych i rekombinacyjnych dla serii zbadanych kryształów $Si_{1-x}Ge_x$, według [**H6**].

Próbka	Przewodnictwo cieplne λ [W/cmK]	Dyfuzyjność termiczna α [cm^2/s]	Czas życia τ [μs]
Si	1.56	0.96 ± 0.203	120 ± 7.345
$Si_{0.987}Ge_{0.013}$	0.77	0.15 ± 0.027	13 ± 1.356
$Si_{0.955}Ge_{0.045}$	0.35	0.085 ± 0.007	3 ± 0.198
$Si_{0.943}Ge_{0.057}$	0.29	0.072 ± 0.017	1.5 ± 0.18

3.4 Mapowanie parametrów rekombinacyjnych

Opracowanie procedury umożliwiającej wyznaczanie rozkładu przestrzennego czasów życia i koncentracji pułapek w płytkach krzemowych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych

3.4 Mapowanie parametrów rekombinacyjnych



Rys.14. Mapa czasów życia $\tau_1(x,y)$ (a) (bez podświetlania) oraz mapa czasów życia $\tau_2(x,y)$ (b) (z podświetlaniem), badanej płytki krzemowej, według [**H7**].

3.4 Mapowanie parametrów rekombinacyjnych

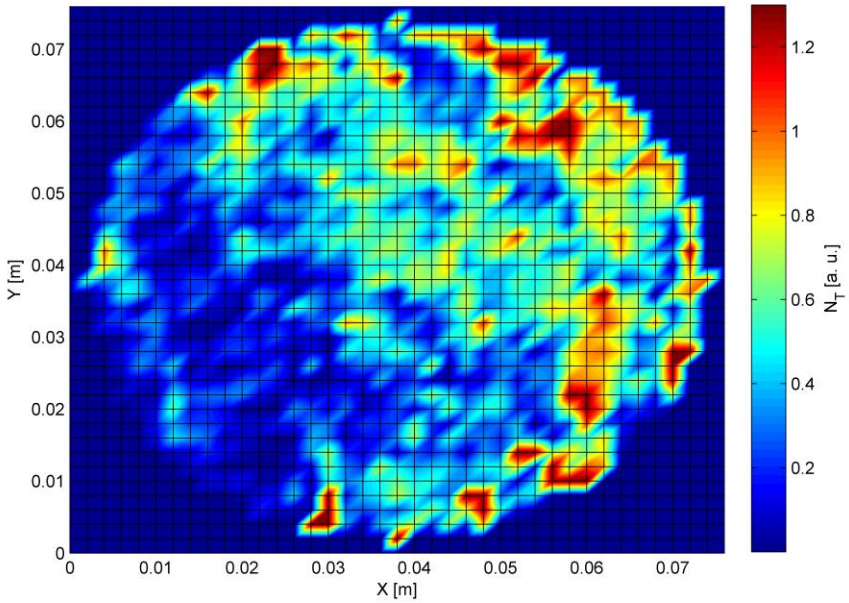
Procedura

1) Pomiar rozkładu przestrzennego amplitudy sygnału MFCA na badanej próbce

2) Pomiar charakterystyki częstotliwościowej amplitudy sygnału MFCA w dwóch wybranych punktach płytki celem wyznaczenia krzywej kalibracyjnej tj. zależności liniowej czasu życia nośników i amplitudy sygnału MFCA

3) Przeliczenie mapy amplitudowej na mapę czasu życia z wykorzystaniem wyznaczonej krzywej kalibracyjnej

4) Obliczenie mapy koncentracji pułapek w próbce



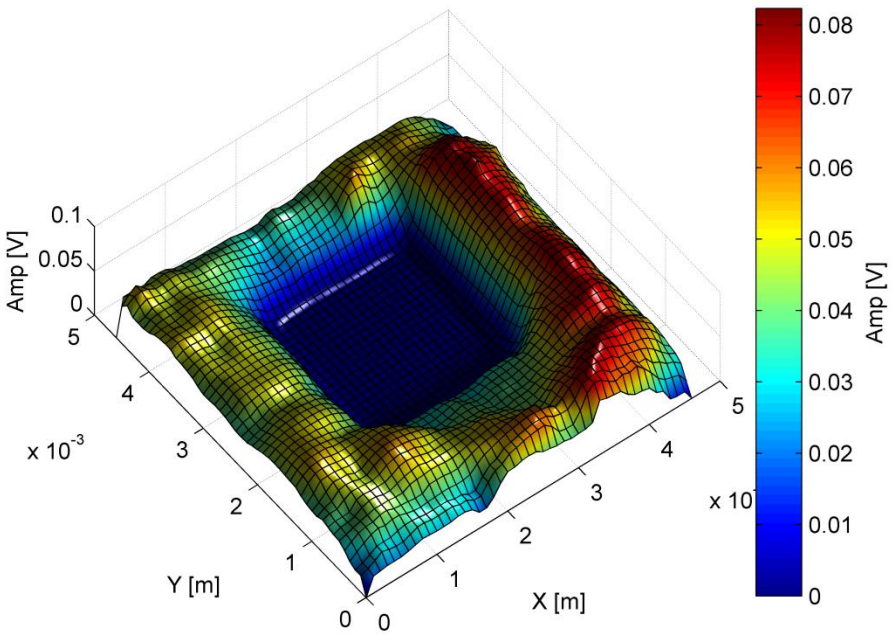
Rys.15. Mapa rozkładu koncentracji defektów badanej płytki krzemowej, według [**H7**].

$$\Delta N(x,y) = A \cdot \left(\frac{1}{\tau_1(x,y)} - \frac{1}{\tau_2(x,y)} \right)$$

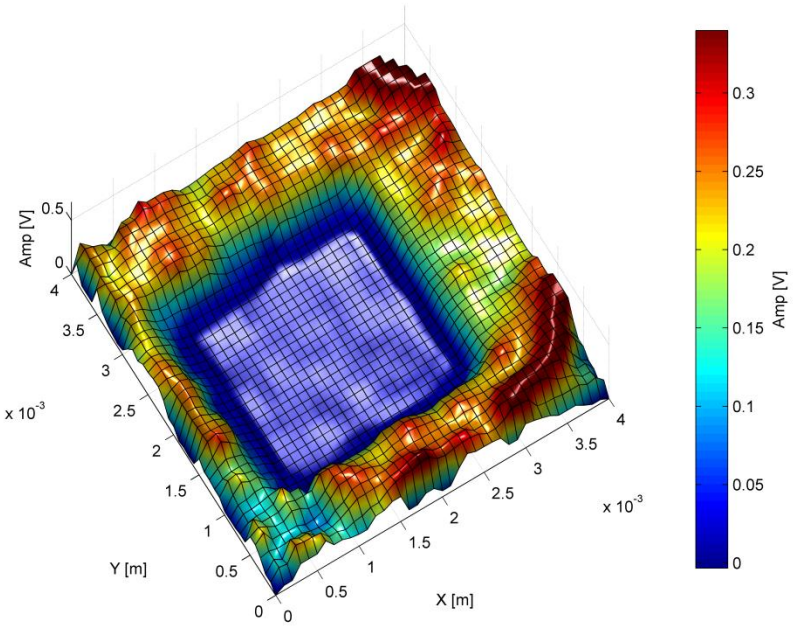
3.5 Badania warstw implantowanych jonowo

Zobrazowanie obszarów implantowanych jonowo w krzemie z wykorzystaniem techniki MFCA i PTR, wyznaczenie zmian parametrów rekombinacyjnych i optycznych w krzemie, opracowanie modelu uproszczonego umożliwiającego wyznaczenie wzrostu współczynnika absorpcji optycznej w warstwach implantowanych

3.5 Badania warstw implantowanych jonowo



a)



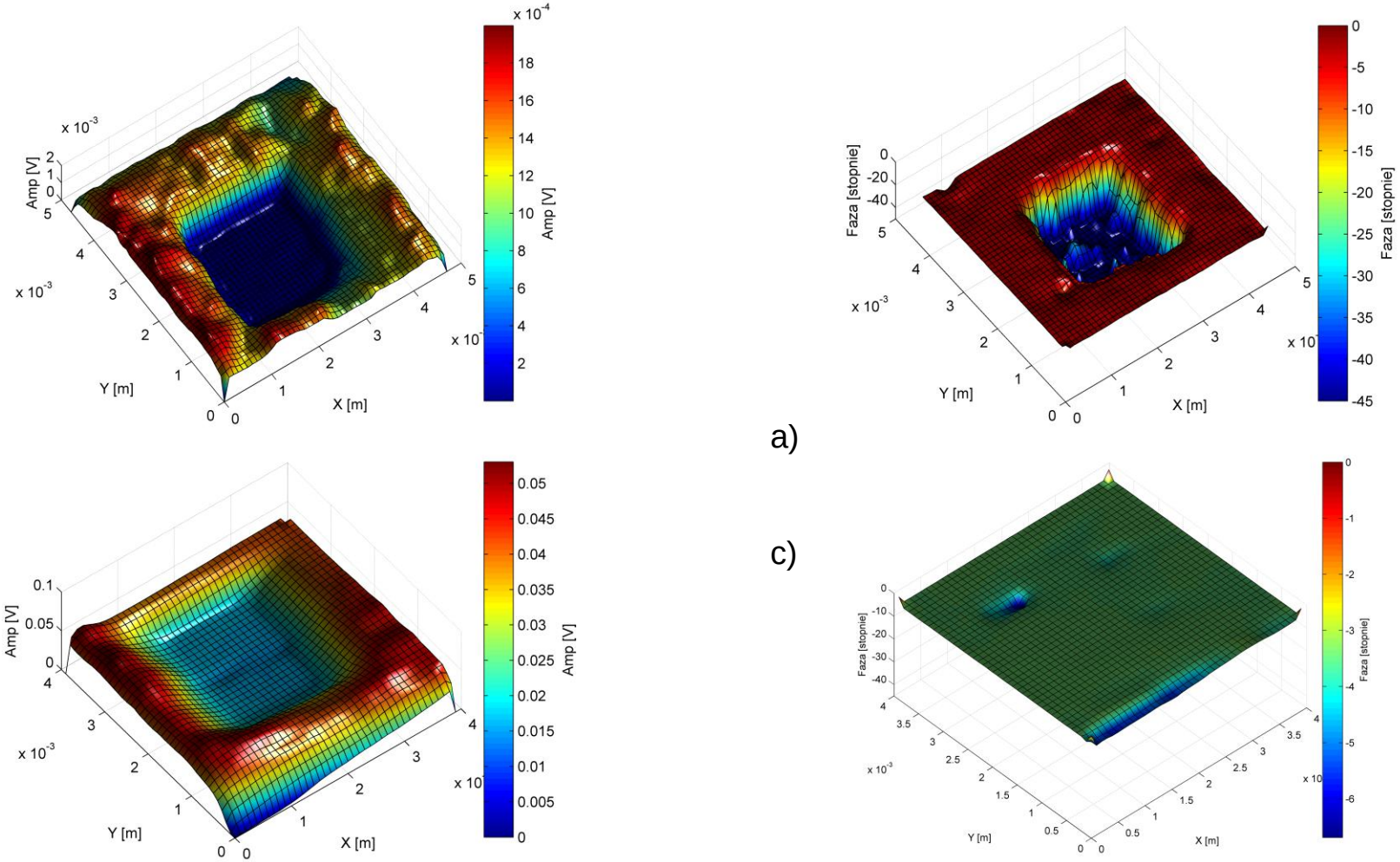
b)

Rys.16a. Mapa sygnału PTR dla próbki krzemowej implantowanej jonami Złota, według [**H8**].

Rys.16b. Mapa sygnału MFCA dla próbki krzemowej implantowanej jonami Germanu, według [**H11**].

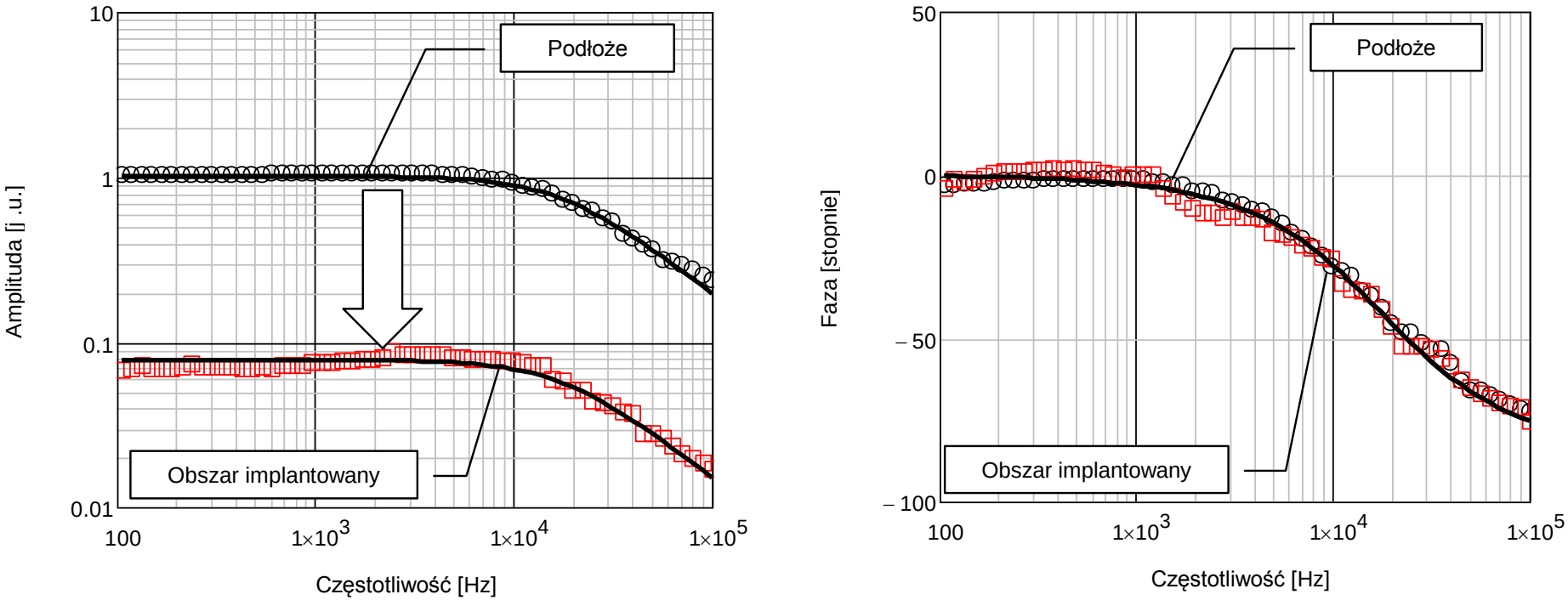
Kontrast amplitudowy kA(Ef,f)=(Amp si-Amp impl)/Ampsi

3.5 Badania warstw implantowanych jonowo



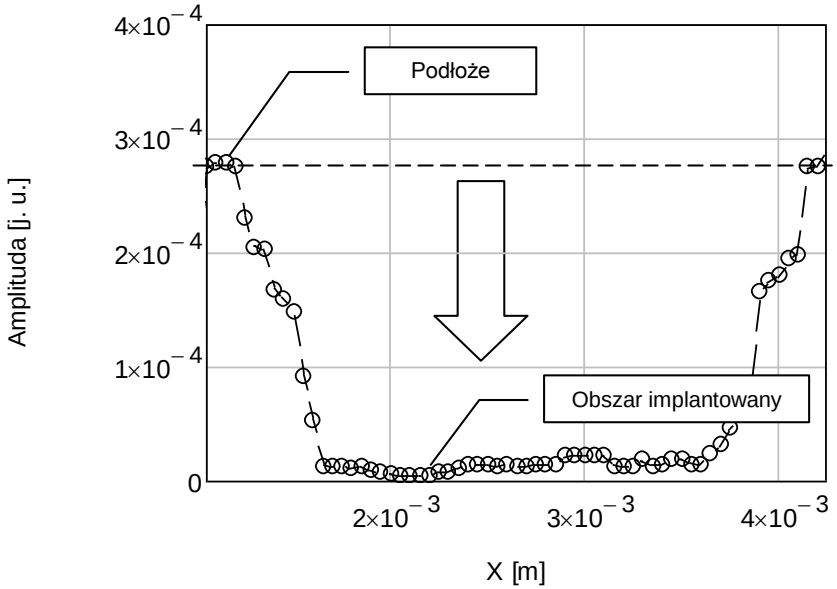
Rys.17. Mapy amplitudowe (a,c) i fazowe (b,d) sygnału PTR dla próbki krzemowej implantowanej jonami Germanu, zmierzone dla długości światła wzbudzającego 520 nm (a,c) oraz 808 nm (b,d).

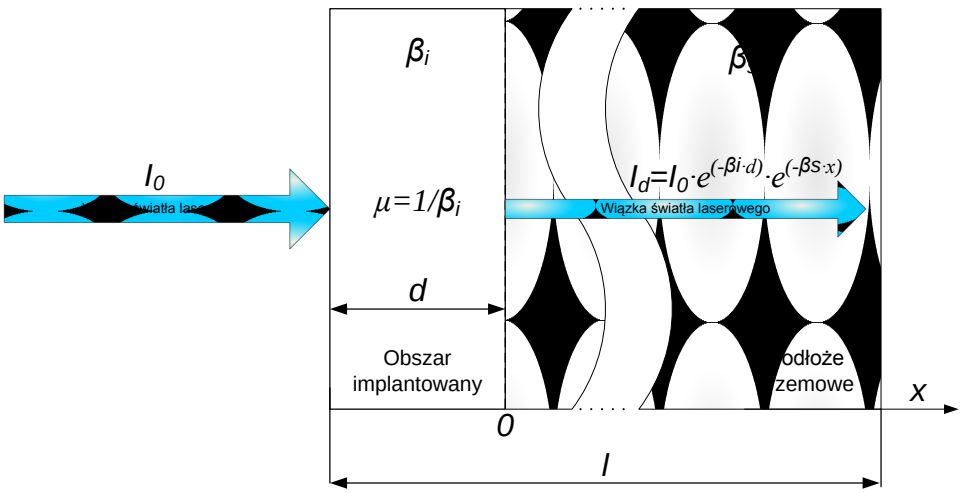
3.5 Badania warstw implantowanych jonowo



Rys.18. Charakterystyki teoretyczne i eksperymentalne amplitudowe (a) oraz fazowe (b) sygnału MFCA otrzymane dla próbki krzemowej implantowanej jonami Ge^{+}, według [**H11**]. Linie ciągłe – krzywe teoretyczne, kółka - sygnał zmierzony w obszarze podłoża krzemowego, kwadraty – sygnał zmierzony w obszarze implantowanym. Długość światła wzbudzającego λex=660 nm.

3.5 Badania warstw implantowanych jonowo

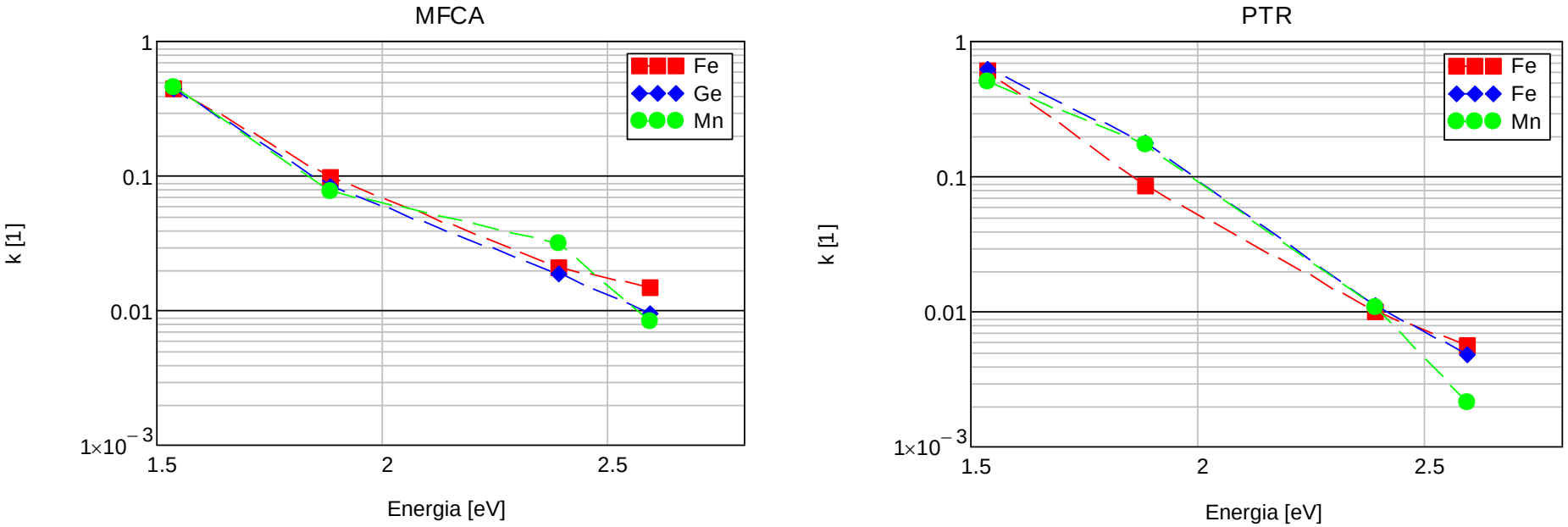




Rys.19a. Profil amplitudowy sygnału MFCA zmierzony wzdłuż próbki krzemowej implantowanej jonami Ge^{+} dla długości światła wzbudzającego λex=520 nm, według [**H11**].

Rys.19b. Schemat próbki krzemowej implantowanej poddanej wzbudzeniu przez światło laserowe.

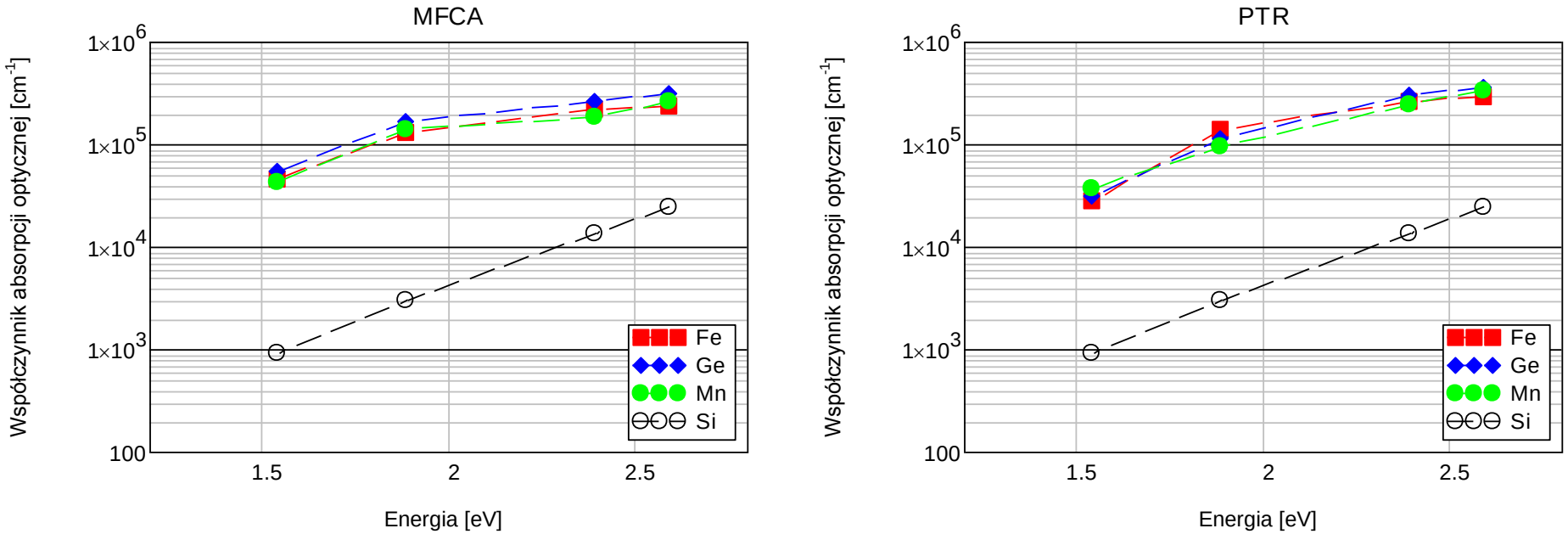
3.5 Badania warstw implantowanych jonowo



Rys.20. Eksperymentalne zależności *k(E)* w funkcji energii fotonów dla próbek krzemu implantowanego jonami Fe^+, Ge^+ i Mn^+ wyznaczone z wykorzystaniem metody MFCA (a) i PTR (b), według H[**11**].

$$k(E) = \frac{Amp_i(E)}{Amp_s(E)} = \exp\left[-n \cdot \beta_s(E) \cdot d\right]$$

3.5 Badania warstw implantowanych jonowo



Rys.21. Widma współczynnika absorpcji optycznej, obliczone z wyników uzyskanych metodą MFCA (a) oraz PTR (b), obliczone dla próbek implantowanych jonami Fe^+, Ge^+, Mn^+ oraz widmo współczynnika absorpcji optycznej dla podłoża krzemowego, według [**H11**].

3.5 Badania warstw implantowanych jonowo

Tab.3. Zmiany współczynnika absorpcji optycznej *βi=n·βs* uzyskane dla próbek krzemowych implantowanych jonami Fe^+, Ge^+, Mn^+, według [**H11**].

Jon	Grubość warstwy [cm]	n (MFCA) [1]	n (PTR) [1]	Energia [keV]	Dawka [j/cm^2]	Grubość próbki [cm]
Fe^+	$0.1744 \cdot 10^{-4}$	33.94 ± 4.88	35.09 ± 13.11	100	10^{14} cm^{-2}	0.0375
Ge^+	$0.1490 \cdot 10^{-4}$	40.50 ± 4.15	35.30 ± 4.35	100	10^{14} cm^{-2}	0.0375
Mn^+	$0.1814 \cdot 10^{-4}$	32.56 ± 4.63	36.22 ± 7.8	100	10^{14} cm^{-2}	0.0375

Tab.4. Zmiany współczynnika absorpcji optycznej *βi=n·βs* dla próbek krzemowych implantowanych jonami Ar^{8+}, O^{6+}, według [**H9**] i [**H10**].

Jon	Grubość warstwy [cm]	n [1]	Energia [keV]	Dawka [j/cm^2]	Grubość [cm]
$Ar8^+$	0.2576	15 ± 5.7	120	$5 \cdot 10^{13}$	0.038
$O6^+$	0.4208	7 ± 6.4	90	$5 \cdot 10^{14}$	0.041

4.1 Podsumowanie

1. Wyznaczenie wybranych parametrów termicznych i optycznych kryształów CdTe i CdBeMnTe z wykorzystaniem spektroskopii fotoakustycznej oraz zaproponowanie poprawki modelowej uwzględniającej wpływ komory na sygnał fotoakustyczny umożliwiającej poprawną interpretację wyników doświadczalnych

2. Wyznaczenie parametrów termicznych kryształów CdBeMnTe z wykorzystaniem spektroskopii fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości z uwzględnieniem czynnika membranowego, którego pominięcie prowadzi do błędnej interpretacji wyników eksperymentalnych

3. Opracowanie metody mającej na celu odróżnienie fal plazmowych od czynnika membranowego, które to czynniki wchodzą w skład sygnału fotoakustycznego i umożliwiającej przeprowadzenie prawidłowej interpretacji badań materiałów półprzewodnikowych z wykorzystaniem spektroskopii fotoakustycznej w dziedzinie częstotliwości

4.2 Podsumowanie

4. Zaproponowanie modeli uproszczonych sygnału PTR oraz opracowanie metody wyznaczania wybranych parametrów termicznych i rekombinacyjnych kryształów SiGe z wykorzystaniem fototermicznej radiometrii w podczerwieni

5. Opracowanie procedury umożliwiającej wyznaczanie rozkładu czasów życia i koncentracji pułapek w płytkach krzemowych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych

6. Zobrazowanie obszarów implantowanych jonowo w krzemie z wykorzystaniem techniki MFCA i PTR, zinterpretowanie i wyjaśnienie zmian parametrów rekombinacyjnych i optycznych w krzemie, będących rezultatem implantacji jonowej, opracowanie modelu uproszczonego umożliwiającego wyznaczenie wartości współczynnika absorpcji optycznej w warstwach implantowanych

Dziękuję za uwagę

5.1 Skrócone zestawienie działalności naukowej

	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Artykuły w czasopismach z bazy JCR	15	12
Artykuły w czasopismach innych niż ujęte w bazie JCR	15	8

	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Suma punktów IF	19.27	19.177
Suma punktów MNiSW	385	346

	Liczba cytowań	Liczba cytowań bez autocytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	130	47	8
Scopus	137	50	8

	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
Prezentacje na konferencjach międzynarodowych	-	5
Prezentacje na konferencjach krajowych	3	5

5.1 Skrócone zestawienie działalności naukowej

Działalność dydaktyczna

- **6** wypromowanych prac dyplomowych inżynierskich **2013-2018**
- **3** zrecenzowane prace dyplomowe inżynierskie **2013-2018**
- Promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim: Wiesław Madej, „Analiza teoretyczna i doświadczalna możliwości zautomatyzowania oraz zastosowania metod fototermicznych i rekombinacyjnych do badań wybranych półprzewodników i struktur półprzewodnikowych”, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, wszczęcie przewodu **24.10.2017**.

5.1 Skrócone zestawienie działalności naukowej

Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną

- Nagroda indywidualna III stopnia Rektora Politechniki Koszalińskiej za dorobek naukowy w roku 2011, **2012**.
- Wyróżnienie rozprawy doktorskiej „Rozwinięcie metod fotoakustycznych do nieniszczącego wyznaczania parametrów optycznych i rekombinacyjnych wybranych materiałów optoelektronicznych”, Rada Wydziału Elektroniki i Informatyki Politechniki Koszalińskiej **2013**.
- Nagroda indywidualna II stopnia Rektora Politechniki Koszalińskiej za uzyskanie stopnia naukowego doktora, **2014**.
- Nagroda indywidualna III stopnia Rektora Politechniki Koszalińskiej za dorobek naukowy w latach 2013-2014, **2015**.
- Zespołowe wyróżnienie Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za osiągnięcia uzyskane w dziedzinie naukowo - badawczej w 2014 roku, **2015**.
- Nagroda Rektora indywidualna II stopnia Politechniki Koszalińskiej za dorobek naukowy w roku 2015, **2016**.