

## Badania wybranych materiałów optoelektronicznych z wykorzystaniem fototermicznej radiometrii w podczerwieni

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań materiałów optoelektronicznych z wykorzystaniem fototermicznej radiometrii w podczerwieni (PTR). Opisane zostały szczegóły dotyczące wykorzystanej techniki badawczej. Badania przeprowadzono na próbkach krzemu i krzemu – germanu. Omówiono szczegóły techniczne dotyczące wymagań sprzętowych na potrzeby stanowiska badawczego. W pracy przedyskutowano możliwości interpretacyjne płynące z zastosowania opisanej metody badawczej oraz opisanych modeli matematycznych sygnału PTR.

**Abstract.** In this paper the experimental results of the photothermal radiometry (PTR) investigations of the optoelectronic materials have been presented. The details concerning the used technique have been described. Investigations have been performed on the silicon and silicon-germanium samples. Details of the experimental set-up have been discussed. In this work the interpretation abilities connected with the usage of the described experimental method and the described PTR signal mathematical models have been discussed. (*Investigations of chosen optoelectronic materials with the photothermal infrared radiometry*).

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, radiometria w podczerwieni, krzem, krzem-german, parametry rekombinacyjne, czas życia nośników.

**Keywords:** Nondestructive testing, photothermal infrared radiometry, silicon, silicon-germanium, recombination parameters, carriers lifetime.

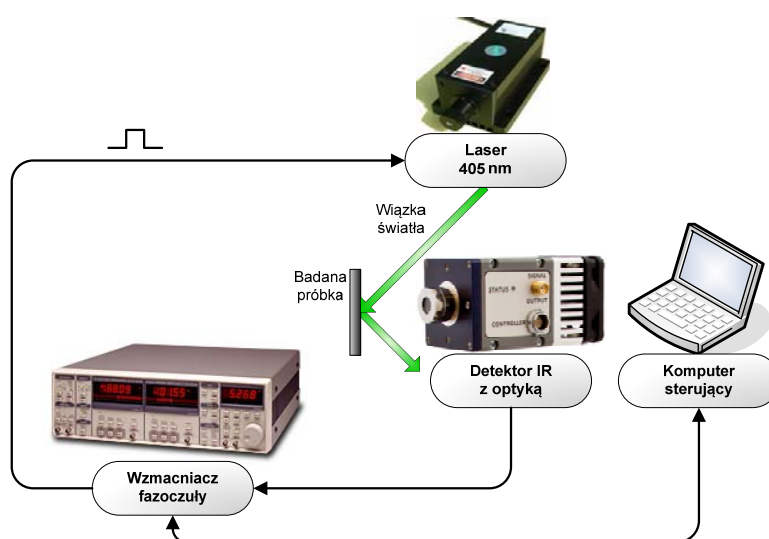
### Wprowadzenie

Materiały optoelektroniczne są w ciągłym spektrum zainteresowań badawczych. Ich parametry np. rekombinacyjne mają istotny wpływ na wydajność i sprawność urządzeń oraz elementów realizowanych na ich podstawie. Urządzenia te przykładowo wykorzystywane są w pozyskiwaniu energii z odnawialnych źródeł. Metoda fototermicznej radiometrii w podczerwieni jest jedną z metod pozwalających na uzyskanie informacji głównie na temat parametrów rekombinacyjnych próbek.

### Metoda eksperymentalna

Na rysunku 1 został przedstawiony schemat blokowy zbudowanego stanowiska eksperymentalnego wykorzystanego do badań metodą (PTR) fototermicznej radiometrii w podczerwieni. W skład stanowiska badawczego wchodził laser półprzewodnikowy pracujący na długości fali 405 nm i mocy optycznej 200 mW. Laser ten pełni rolę modulowanego natężeniowo źródła wzbudzenia promieniowania termicznego, podczerwonego. Szerokość wiązki światła laserowego nie przekraczała 1 mm. Wiązka światła skierowana była na badaną próbkę materiału półprzewodnikowego. Promieniowanie podczerwone było

rejestrowane za pomocą detektora fotowoltaicznego PVI-3TE-5 firmy VIGO System S.A. Powierzchnia aktywna detektora wynosiła 0,5 x 0,5 mm. Detektor wyposażony był w soczewkę immersyjną BaF<sub>2</sub>. Detektor optymalizowany był na długość fali 5.5 μm i był umieszczony na trzostopniowej chłodziarce termoelektrycznej. Detektor posiadał wbudowany przedwzmacniacz transimpedancyjny na pasmo 10 Hz – 1 MHz. Układ detektora wyposażono w jednosoczewkowy obiektyw na zakres widmowy 2 μm – 5 μm i ogniskowej 25 mm. Rejestrowany sygnał napięciowy z detektora podawany był na dwukanałowy wzmacniacz fazoczuły (Stanford Research SR 830), z którego generowany jest również sygnał przebiegu modulującego dla lasera pompującego. Stanowiskiem zarządzała aplikacja napisana w języku wysokiego poziomu C++, w której zaimplementowano niezbędne algorytmy sterujące i akwizycyjne. Kalibrację układu pomiarowego przeprowadzono na próbce węgla szklanego. Na tak zbudowanym układzie wykonano pomiary charakterystyk częstotliwościowych amplitudowych i fazowych sygnału PTR w konfiguracji odbiciowej serii próbek Si oraz Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>.



Rys. 1. Schemat poglądowy stanowiska eksperymentalnego do badań z wykorzystaniem techniki radiometrii w podczerwieni

Sygnal PTR może być opisany, jako suma komponentów termicznego i plazmowego [1, 2, 3]. Można wykazać, iż ogólny wzór opisujący sygnał PTR (1) można znacznie uprościć do postaci wzorów (2, 3, 4), w których komponent termiczny stanowi pierwszą część wzorów podczas gdy drugą część stanowi komponent plazmowy. Sygnal PTR dla przypadku dużej absorpcji promieniowania

$$(1) \quad PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = C_T \cdot \int_0^d \partial T(x, f, \tau, V_1, V_2, \alpha, \lambda) \cdot dx + C_N \cdot \int_0^d \partial n(x, f, \tau, V_1, V_2) \cdot dx$$

Wzór na sygnał PTR w proponowanej postaci dany jest zależnościami:

$$(2) \quad PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = C \left[ B \frac{1}{\sqrt{f}} \exp\left(-i \frac{\pi}{4}\right) + \frac{1}{A} \int_0^d \delta n(x, f, \tau, V_1, V_2) dx \right]$$

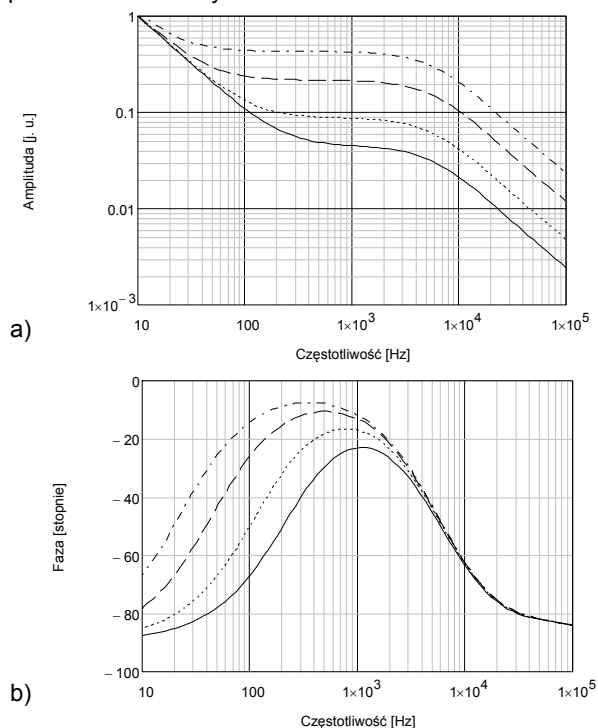
$$(3) \quad PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = C \left[ B \frac{1}{f^{1.5}} \exp\left(-i \frac{\pi}{4} 1.5\right) + \frac{1}{A} \int_0^d \delta n(x, f, \tau, V_1, V_2) dx \right]$$

$$(4) \quad PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = C \left[ B \frac{1}{f} \exp\left(-i \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{A} \int_0^d \delta n(x, f, \tau, V_1, V_2) dx \right]$$

$$(5) \quad Amp(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = |PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B)|$$

$$(6) \quad Ph(f, \tau, V_1, V_2, A, B) = \frac{180}{\pi} [PTR(f, \tau, V_1, V_2, A, B)]$$

Przykładowe charakterystyki teoretyczne ilustrujące wpływ komponentu plazmowego, wyrażonego parametrem A, na charakterystyki częstotliwościowe, amplitudowe i fazowe, sygnału PTR w modelu (4) małej absorpcji promieniowania podczerwonego, termicznego w próbce przedstawiono na rysunku 2.

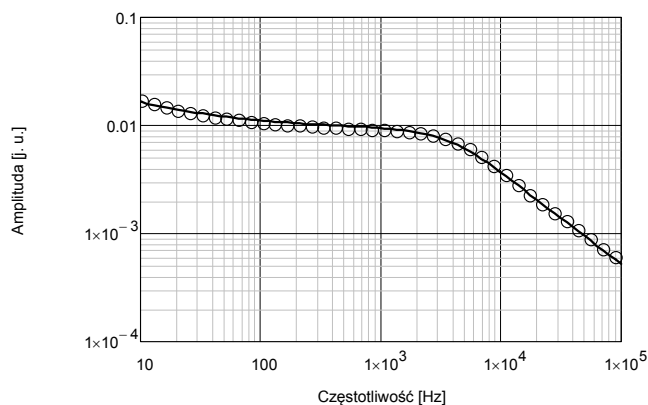


Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki amplitudowe (a) i fazowe (b) sygnału PTR obliczone dla różnych wartości parametru A od  $10 \cdot 10^{-6}$  do  $100 \cdot 10^{-6}$ . Pozostałe charakterystyki amplitudowe wartości parametrów przyjętych do symulacji:  $B = 10$ ,  $V_1 = 500$  cm/s,  $V_2 = 1500$  cm/s,  $\tau = 1$   $\mu$ s,  $d = 0,05$  cm

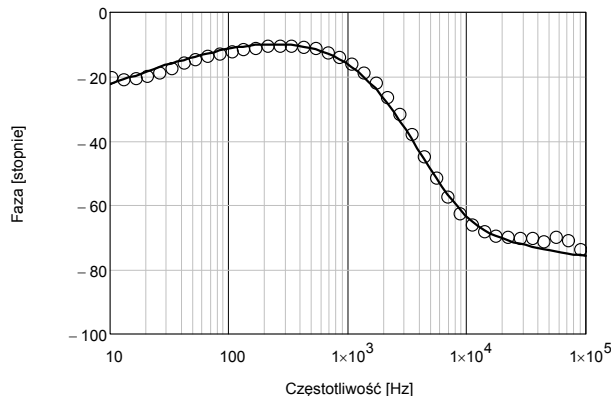
podczerwonego w próbce można opisać wzorem (2). Sygnal PTR dla przypadku małej absorpcji promieniowania podczerwonego w próbce można opisać wzorem (4). Wzór (3) opisuje przypadek pośredni wielkości absorpcji promieniowania podczerwonego. Wzór na sygnał PTR dany jest w postaci ogólnej:

### Wyniki badań

Przykładowe doświadczalne charakterystyki częstotliwościowe amplitudowe i fazowe sygnału PTR uzyskane na próbce Si przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



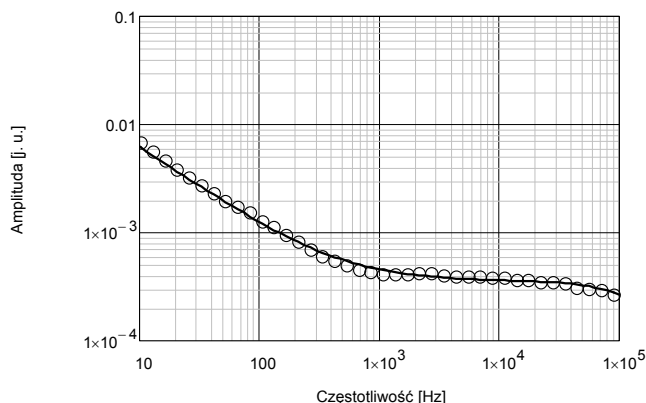
Rys. 3. Teoretyczna i eksperymentalna charakterystyka amplitudowa sygnału PTR dla zbadanej próbki krzemowej. Kółka - wyniki doświadczalne, linia ciągła - krzywa teoretyczna.



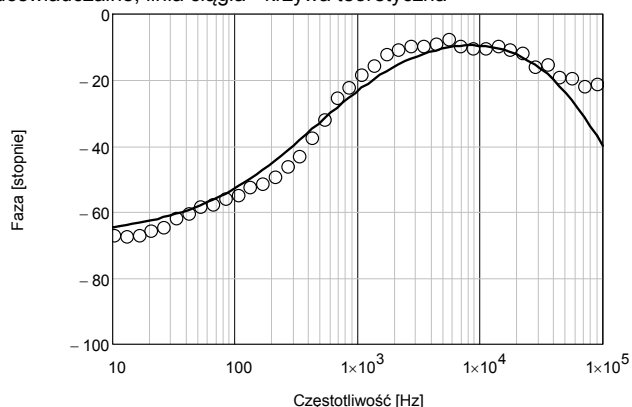
Rys. 4. Teoretyczna i eksperymentalna charakterystyka fazowa sygnału PTR dla zbadanej próbki krzemowej. Kółka - wyniki doświadczalne, linia ciągła - krzywa teoretyczna

Najlepsze dopasowania charakterystyk teoretycznych do wartości eksperymentalnych uzyskano w modelu (2) dużej absorpcji promieniowania podczerwonego dla następujących wartości parametrów:  $V_1 = 690$  cm/s,  $V_2 = 1500$  cm/s,  $\tau = 120$   $\mu$ s,  $A = 1 \cdot 10^{-6}$ ,  $B = 14$ .

Przykładowe doświadczalne charakterystyki częstotliwościowe, amplitudowe i fazowe, sygnału PTR uzyskane na próbce  $Si_{0.943}Ge_{0.057}$  przedstawiono na rysunkach 5 i 6.



Rys. 5. Teoretyczna i eksperymentalna charakterystyka amplitudowa sygnału PTR dla zbadanej próbki krzemowo-germanowej o koncentracji germanu 5,7%. Kółka - wyniki doświadczalne, linia ciągła - krzywa teoretyczna



Rys. 6. Teoretyczna i eksperymentalna charakterystyka fazowa sygnału PTR dla zbadanej próbki krzemowo-germanowej o koncentracji germanu 5,7%. Kółka - wyniki doświadczalne, linia ciągła - krzywa teoretyczna

Najlepsze dopasowania charakterystyk teoretycznych do wartości eksperymentalnych uzyskano w modelu (3) średniej absorpcji promieniowania podczerwonego dla następujących wartości parametrów:  $V_1 = 990$  cm/s,  $V_2 = 1500$  cm/s,  $\tau = 1,5$   $\mu$ s,  $A = 1 \cdot 10^{-6}$ ,  $B = 19$ .

### Podsumowanie

Wyniki uzyskane na próbkach Si i  $Si_{1-x}Ge_x$  o różnych koncentracjach Germanu tj. 1,3%, 3,1%, 4,5%, 5,7%

pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków. Czas życia nośników generowanych światłem zmienił się odpowiednio od 13  $\mu$ s przez 4,5  $\mu$ s, 3,5  $\mu$ s do 1,5  $\mu$ s. Wzrost koncentracji Germanu powodował średnio skrócenie się czasu życia nośników prawie 10-krotnie. Dla porównania czas życia nośników w badanej próbce krzemowej wynosił 120  $\mu$ s. Analiza teoretyczna charakterystyk częstotliwościowych uzyskanych na próbkach pozwoliły określić również charakter komponentu termicznego w sygnale PTR. Nie jest on jednakowy dla różnych próbek. Próbkę krzemową wykazywały charakter komponentu termicznego typowy dla dużej absorpcji promieniowania podczerwonego taki jak jest przykładowo w metalach. Próbkę SiGe wykazywały odmienny charakter komponentu termicznego. Jest to charakter pośredni między modelem ciała przezroczystego dla podczerwieni a modelem ciała nieprzezroczystego dla podczerwieni. Przykładowo model ciała przezroczystego dla podczerwieni dobrze opisywał charakterystyki częstotliwościowe komponentu termicznego dla serii próbek CdSe oraz CdMgSe [4, 5, 6]. Zaletą zaproponowanego modelu komponentu termicznego jest jego prostota oraz zgodność charakterystyk zarówno amplitudowych jak i fazowych sygnału PTR z eksperymentem.

**Autorzy:** dr inż. Łukasz Chrobak, dr hab. Mirosław Maliński, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: [miroslaw.malinski@tu.koszalin.pl](mailto:miroslaw.malinski@tu.koszalin.pl).

### LITERATURA

- [1] Salnic A., Mandelis A., Ruda H., Jean C., Relative sensitivity of photomodulated reflectance and photothermal infrared radiometry to thermal and carrier plasma waves in semiconductors, *J. Appl. Phys.* 82(4), (1997), 1853-1859
- [2] Salnic A., Mandelis A., Jean C., Noncontact measurement of transport properties of long-carrier-lifetime wafers using photothermal radiometry, *Appl. Phys. Lett.* 69(17), (1996), 2522-2524
- [3] Mandelis A., Laser infrared photothermal radiometry of semiconductors: principles and applications to solid state electronics, *Solid - State Electronics* 42(1), (1998), 1-15
- [4] Pawlak M., Maliński M., Minority carrier recombination lifetimes in n-type CdMgSe mixed crystals measured by means of the photothermal infrared radiometry, *Opto-Electronics Review* 22(1), (2014), 31-35
- [5] Pawlak M., Maliński M., Influence of the  $Ar^{8+}$  and  $O^{6+}$  ion implantation on the recombination parameters of p and n type implanted Si samples investigated by means of the photothermal radiometry, *Infrared Physics & Technology* 63, (2014), 6-9
- [6] Maliński M., Pawlak M., Chrobak Ł., Pal S., Ludwig A., Monitoring of Amorphization 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