

Obrazowanie obszarów implantowanych w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki radiometrii w podczerwieni

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały zagadnienia dotyczące możliwości wykorzystania nieniszczącej techniki radiometrii w podczerwieni PTR (PhotoThermal Radiometry) do wizualizacji obszarów implantowanych w krzemie. Przedstawiony został szczegółowy opis zrealizowanego stanowiska eksperymentalnego. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań, w formie mapy, rozkładu oraz przekroju amplitudy i fazy sygnału PTR, uzyskanych dla zbadanej implantowanej próbki krzemowej.

Abstract. This paper presents issues connected with possibilities of the usage of the nondestructive infrared photothermal radiometry technique PTR (PhotoThermal Radiometry) for visualization of the implanted areas in silicon. Detailed description of the realized experimental set-up has been presented. Example results in the form of the maps and profiles of the amplitude and phase of the PTR signal obtained for the investigated sample have been presented. (Visualization of the implanted areas in semiconductor materials with the use of the nondestructive infrared photothermal radiometry technique).

Słowa kluczowe: badania nieniszczące, radiometria w podczerwieni, krzem, parametry rekombinacyjne, czas życia nośników, implantacja jonowa, obrazowanie

Keywords: nondestructive testing, photothermal radiometry, silicon, recombination parameters, minority carriers lifetime, ion implantation, visualization

Wprowadzenie

Podstawy teoretyczne dotyczące radiometrii w podczerwieni, zostały przedstawione w pracach [1-3]. Składowa periodyczna sygnału PTR może być opisana, jako suma komponentów termicznego i plazmowego:

(1)

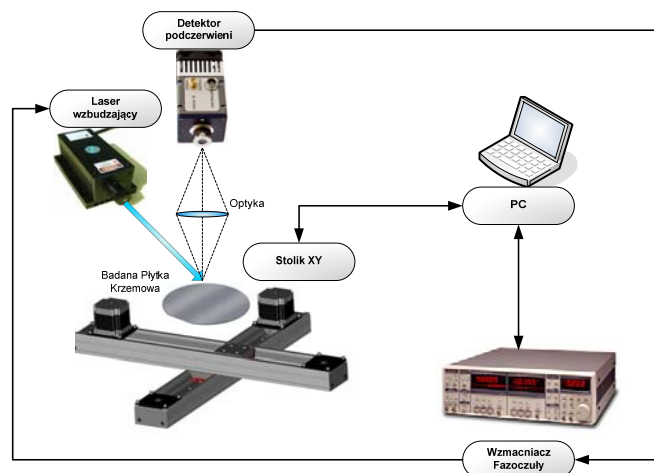
$$PTR(f, \tau, V_1, V_2) = C_T \cdot \int_0^d \partial T(x, f, \tau, V_1, V_2, \alpha, \lambda) \cdot dx + C_N \cdot \int_0^d \partial n(x, f, \tau, V_1, V_2) \cdot dx$$

gdzie: f – częstotliwość modulacji, τ – czas życia nośników, $V_{1,2}$ – prędkość rekombinacji powierzchniowej, α – dyfuzyjność termiczna, λ – przewodnictwo cieplne.

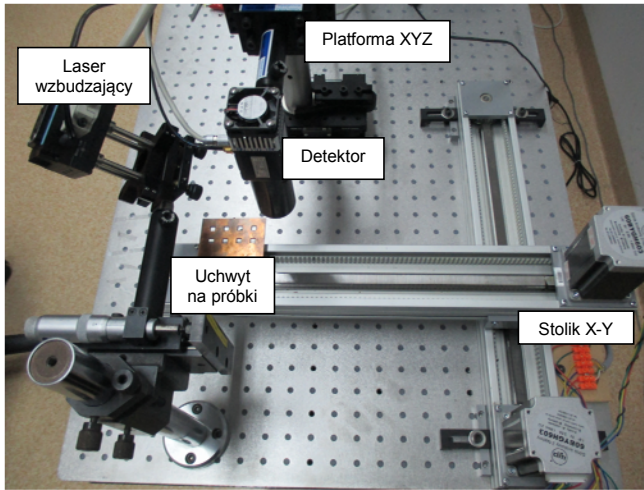
Komponent termiczny jest to periodyczna składowa promieniowania termicznego próbki będąca wynikiem jej periodycznego oświetlenia wiązką laserową i periodycznej zmiany jej temperatury. Komponent plazmowy jest to składowa periodyczna stałego promieniowania termicznego próbki zmodulowana periodycznie zmienną koncentracją nośników. Przykładowe zastosowania omawianej metody w badaniach materiałów optoelektronicznych przedstawiono w pracach [4-7].

Stanowisko badawcze

Schemat poglądowy stanowiska eksperymentalnego użytego do badań przedstawionych w artykule przedstawiono na rysunku 1. W skład stanowiska eksperymentalnego 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. Średnica wiązki światła laserowego nie przekraczała 1 mm. Wiązka światła skierowana była na badaną próbkę krzemu. Promieniowanie podczerwone było rejestrowane za pomocą detektora fotowoltaicznego PVI-3TE-5 firmy VIGO System S.A. Powierzchnia aktywna detektora wynosi 0,5 x 0,5 mm. Detektor wyposażony jest w soczewkę immersyjną BaF2. Detektor optymalizowany jest na długość fali 5,5 μ m i jest umieszczony na trzystopniowej chłodziarce termoelektrycznej. Detektor posiada wbudowany przedwzmacniacz transimpedancyjny na pasmo 10 Hz – 1 MHz.



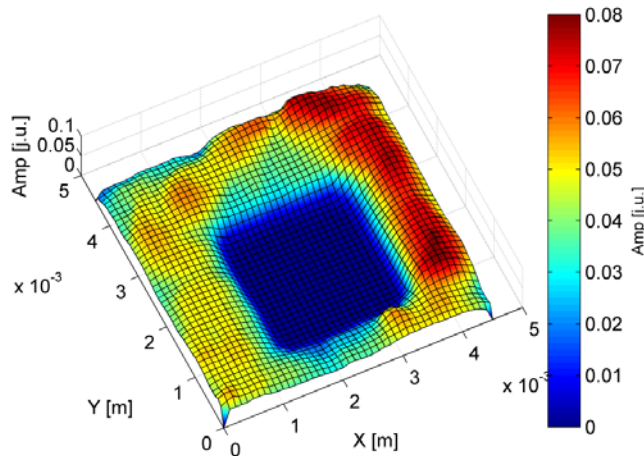
Rys.1. Schemat poglądowy stanowiska eksperymentalnego do mapowania rozkładu amplitudy i fazy sygnału PTR materiałów półprzewodnikowych



Rys.2. Fotografia przedstawiająca zrealizowane stanowisko eksperymentalne do wizualizacji obszarów implantowanych w materiałach półprzewodnikowych metodą PTR

Układ detektora wyposażono w jednosoczewkowy obiektyw na zakres widmowy $2\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$ 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 zarządza aplikacja napisana w języku wysokiego poziomu C++, w której zaimplementowano niezbędne algorytmy sterujące i akwizycyjne. Kalibrację układu pomiarowego przeprowadzono na próbce węgla szklanego. Wszystkie pomiary zostały przeprowadzone w temperaturze pokojowej.

Fotografia przedstawiająca zrealizowane stanowisko do badania obszarów implantowanych w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki radiometrii w podczerwieni została przedstawiona na rysunku 2.

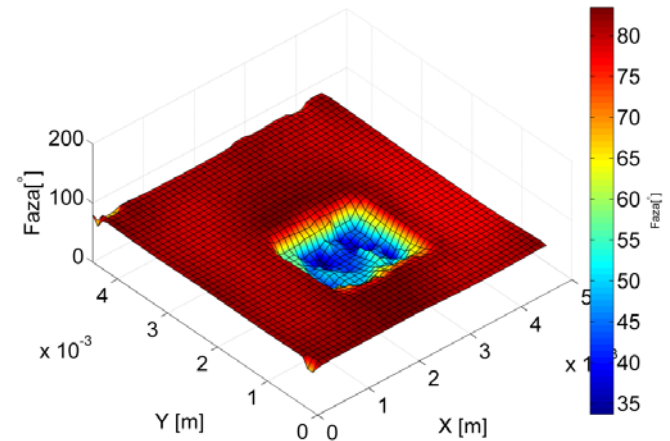


Rys.3. Mapa sygnału amplitudowego PTR uzyskana dla zbadanej implantowanej próbki krzemowej. Częstość modulacji $f = 1\ \text{kHz}$, $\lambda = 405\ \text{nm}$

Wyniki badań

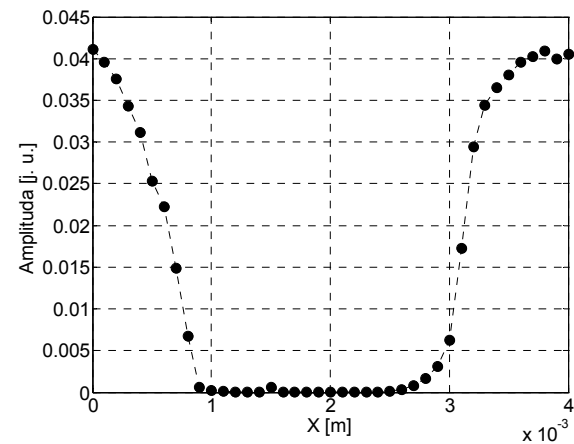
Wstępne badania na zrealizowanym stanowisku pomiarowym przeprowadzono na próbce krzemowej wyhodowanej metodą Czochralskiego. Próbka była implantowana jonami złota. Obszar implantacji miał rozmiary $2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$, natomiast energia implantacji wynosiła 100 keV. Dawka jonów wynosiła $10^{14}\ \text{cm}^{-2}$. Mapę

sygnału amplitudowego PTR zmierzoną z krokiem $50\ \mu\text{m}$, przedstawiono na rysunku 3. Mapę fazy sygnału PTR przedstawiono na rysunku 4.



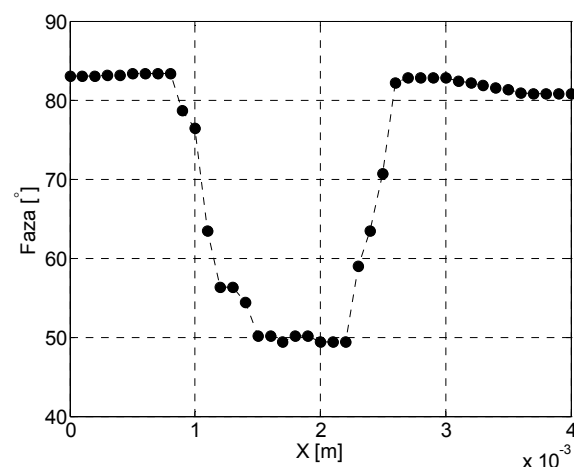
Rys.4. Mapa fazy sygnału PTR uzyskana dla zbadanej implantowanej próbki krzemowej. Częstość modulacji $f = 1\ \text{kHz}$, $\lambda = 405\ \text{nm}$

Przekrój sygnału amplitudowego PTR został przedstawiony na rysunku 5.



Rys.5. Przekrój sygnału amplitudowego PTR uzyskany dla zbadanej implantowanej próbki krzemowej. Częstość modulacji $f = 1\ \text{kHz}$, $\lambda = 405\ \text{nm}$

Przekrój sygnału fazowego PTR został przedstawiony na rysunku 6.



Rys.6. Przekrój sygnału fazowego PTR uzyskany dla zbadanej implantowanej próbki krzemowej. Częstość modulacji $f = 1\ \text{kHz}$, $\lambda = 405\ \text{nm}$

Podsumowanie

W artykule przedstawiono szczegóły dotyczące realizacji stanowiska badawczego z wykorzystaniem nieniszczącej techniki radiometrii w podczerwieni. Przykładowe badania zostały przeprowadzone na próbce krzemu implantowanej jonami złota. Kontrast amplitudowy obszaru nieimplantowanego do obszaru implantowanego $k = \text{AmpSi}/\text{AmpSi-impl}$ wyniósł $k = 1000$. Kontrast fazowy obszaru nieimplantowanego do obszaru implantowanego $\varphi = \text{FazaSi} - \text{FazaSi-impl} = 45^\circ$. Uzyskane wyniki wskazują na potencjalne możliwości wykorzystania omawianej techniki do obrazowania obszarów implantowanych w materiałach półprzewodnikowych.

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

LITERATURA

- [1] Salnik 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] Salnik 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] Chrobak Ł., Maliński M., Badania wybranych materiałów optoelektronicznych z wykorzystaniem fototermicznej radiometrii w podczerwieni, *Przegląd Elektrotechniczny* 92(9) (2016), 122-124
- [5] Chrobak Ł., Maliński M., Pawlak M., 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
- [6] Maliński M., Pawlak M., Chrobak Ł., Pal S., Ludwig A., 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
- [7] Pawlak M., Maliński M., Chrobak Ł., Pal S., Ludwig A., Wykorzystanie fal plazmowych i techniki C-V do charakteryzacji warstw implantowanych jonami O^{+6} w krzemie, *Elektronika - technologie, konstrukcje, zastosowania* 55(9) (2014), 70-72