

Mapowanie czasu życia nośników w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach

Streszczenie. W artykule zaprezentowano tematykę bezkontaktowego mapowania czasów życia nośników w materiałach półprzewodnikowych z wykorzystaniem techniki modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach. Opisano szczegóły techniczne dotyczące realizacji stanowiska badawczego oraz wykorzystanej metody detekcji sygnału. Przedstawiono i przedyskutowano przykładowe mapy czasów życia nośników w krzemie monokrystalicznym. W pracy omówiono również sposób wyznaczania koncentracji pułapek odpowiedzialnych za skrócenie czasu życia nośników.

Abstract. In the paper the issue of a noncontact mapping of the lifetimes of carriers in semiconductor materials with the MFCA method is presented. The technical details of the construction of the experimental set-up and the applied method of detection are described. Example maps of the lifetime spatial distributions in the silicon samples are shown and discussed. In the paper the way of computation of the spatial distribution of the traps responsible for the shortening of the lifetime of carriers is also presented. (**Mapping of the lifetime of carriers in semiconducting materials with the modulated free carrier absorption method**).

Słowa kluczowe: metody nieniszczące, technika modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach, krzem, czasy życia nośników, mapowanie parametrów rekombinacyjnych.

Keywords: nondestructive methods, modulation by free carrier absorption MFCA, silicon, lifetime of excess carriers, mapping of recombination parameters.

Wprowadzenie

Jednymi z ważniejszych parametrów materiałów krzemowych służących do produkcji urządzeń optoelektronicznych, są parametry rekombinacyjne. W znacznej mierze decydują one o wydajności produkowanych na ich bazie urządzeń. Przykładem są ogniwa fotowoltaiczne, gdzie czasy życia nośników są niezwykle istotnym parametrem. W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania metodami pomiarowymi mającymi na celu wyznaczanie tych parametrów [1-3]. Jedną z technik umożliwiających mapowanie parametrów rekombinacyjnych jest technika modulacji absorpcji na swobodnych nośnikach (MFCA) [4-6]. Idea metody MFCA polega na periodycznym wzbudzeniu nośników z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa w wyniku absorpcji światła lasera pompującego (energia fotonów większa od przerwy energetycznej badanego półprzewodnika). W wyniku absorpcji światła i dyfuzji nośników uzyskuje się dyfuzyjne fale plazmowe w próbce, a więc fale gęstości ładunku. Do rejestracji tych fal wykorzystuje się wiązkę laserową w bliskiej podczerwieni (energia fotonów mniejsza od przerwy energetycznej badanego półprzewodnika). Natężenie światła lasera sondującego przechodzącego przez próbkę, ze względu na absorpcję na wzbudzonych nośnikach swobodnych, będzie mniejsze proporcjonalnie do koncentracji nośników swobodnych wygenerowanych światłem lasera wzbudzającego. Sygnał transmisji światła lasera podczerwonego, przy zmodulowanej natężeniowo wiązce światła lasera wzbudzającego, jest zmodulowany w wyniku periodycznie zmiennej koncentracji nośników. Wyniki badań krzemu implantowanego z wykorzystaniem tej techniki przedstawiono w pracach [7-10]. Modyfikację metody MFCA opartą na przestrzennej separacji wiązki lasera pompującego nośniki i wiązki lasera sondującego przedstawiono w pracach [11, 12]. Wyniki badań wpływu szerokości wiązki sondującej na sygnał MFCA przedstawiono w pracy [13]. Czulości tej metody w funkcji odległości wiązki wzbudzającej i wiązki sondującej przedstawiono w pracy [14]. Rozkład przestrzenny nośników w modelu 3D dla metody MFCA przedstawiono w pracy [15]. Porównanie metody MFCA z metodą

mikrofalową przedstawiono w pracy [16]. Zagadnienia dotyczące metody MFCA są ciągle aktualne i znajdują się w szerokim spektrum zainteresowań [17-19].

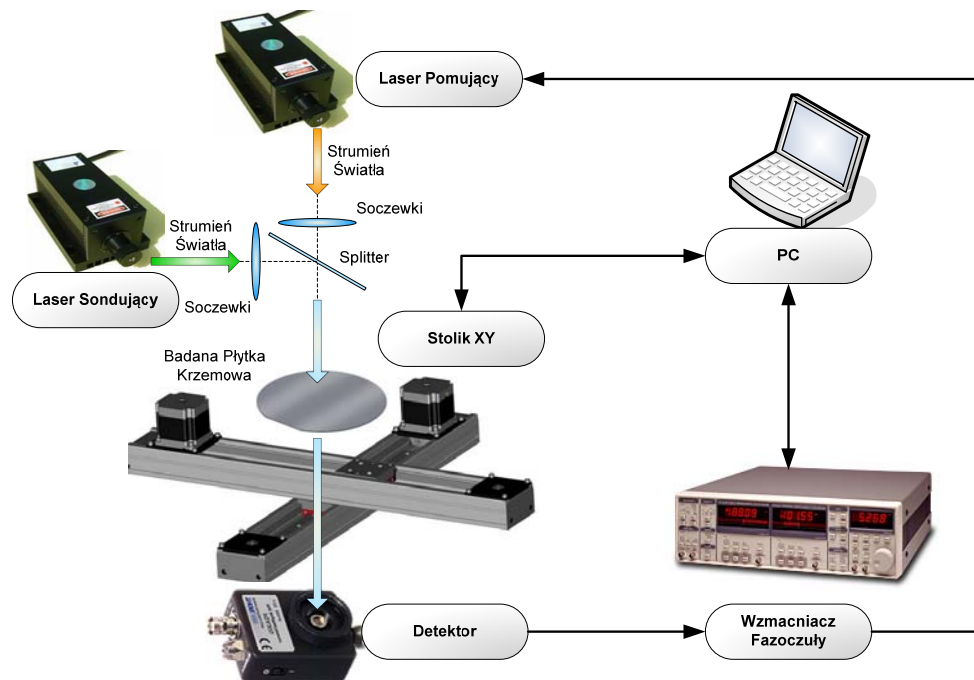
Metoda eksperymentalna

W skład stanowiska badawczego wchodzi dwa lasery półprzewodnikowe. Jeden z nich modulowany natężeniowo w dziedzinie częstotliwości i pracujący na długości fali 425 nm pełni rolę lasera pompującego nośniki z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa oraz laser półprzewodnikowy pracujący w trybie ciągłym na długości fali 1650 nm pełniący rolę lasera sondującego. Obie wiązki światła są skupiane dokładnie w tym samym punkcie na próbce. Natężenie przechodzącego strumienia światła podczerwonego jest rejestrowane za pomocą szybkiego detektora firmy Thorlabs® (seria PDA). Rejestrowany sygnał podawany jest na dwukanałowy wzmacniacz fazoczuły (Stanford Research SR 830), z którego generowany jest również sygnał przebiegu modulującego dla lasera pompującego. Elementem ruchomym, na którym montowana jest płytka badanego krzemu jest stolik XY zbudowany na bazie modułów MLA-K z silnikami krokowymi. Stanowiskiem zarządza aplikacja napisana w języku wysokiego poziomu C++, w której zaimplementowano niezbędne algorytmy sterujące i akwizycyjne. Schemat blokowy stanowiska eksperymentalnego do mapowania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych został przedstawiony na rysunku 1.

Fotografia przedstawiająca zrealizowane stanowisko eksperymentalne do mapowania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych została przedstawiona na rysunku 2.

Zależności na amplitudę i fazę sygnału MFCA w dziedzinie częstotliwości, który jest wprost proporcjonalny do rozkładu przestrzennego ładunku w próbce, obliczane jest według wzorów przedstawionych poniżej [20]

$$(1) \quad \theta(f, \tau, D, V_1, V_2) = 1 - a \int_0^d \delta n(x) dx$$



Rys. 1. Schemat poglądowy stanowiska eksperymentalnego do mapowania czasów życia nośników materiałów półprzewodnikowych



Rys. 2. Fotografia przedstawiająca zrealizowane stanowisko eksperymentalne do mapowania czasów życia nośników materiałach półprzewodnikowych

$$(2) \quad Amp(f, \tau, D, V_1, V_2) = \theta(f, \tau, D, V_1, V_2)$$

$$(3) \quad Phase(f, \tau, D, V_1, V_2) = \frac{180}{\pi} (\theta(f, \tau, D, V_1, V_2))$$

$$(4) \quad \delta n(x) = K(f, \tau) \left[B_1(f, \tau, D, V_1, V_2) e^{\frac{x}{Le(f, \tau)}} + B_2(f, \tau, D, V_1, V_2) e^{\frac{-x}{Le(f, \tau)}} - e^{-\beta x} \right]$$

gdzie: f jest częstotliwością modulacji natężenia światła pompującego, τ jest czasem życia nośników, D – współczynnikiem dyfuzji, V_1, V_2 są prędkościami rekombinacji powierzchniowej próbki, d – grubością próbki, $Le(f, \tau)$ – drogą dyfuzji nośników, x – współrzędną przestrzenną prostopadłą do oświetlanej powierzchni próbki.

Wyniki badań

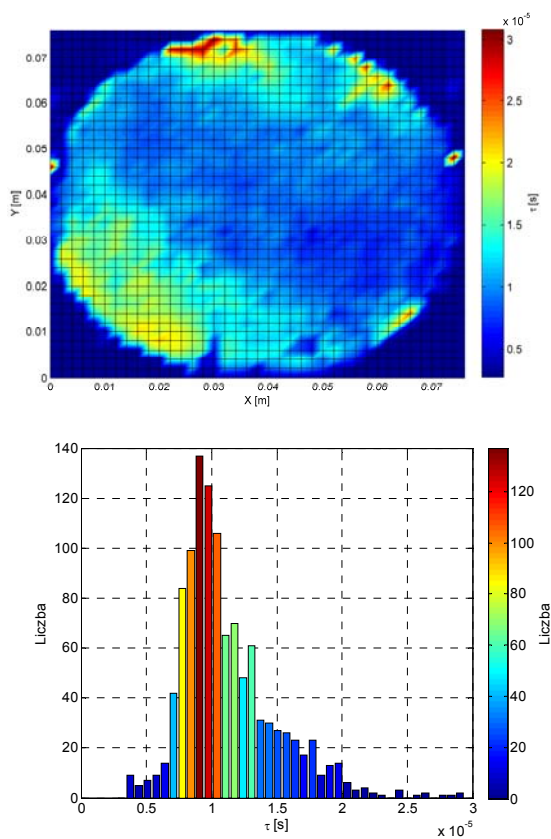
Pomiary rozkładów czasu życia nośników prowadzone są bez podświetlania lub z dodatkowym podświetleniem płytki w czasie pomiaru dla zadanej częstotliwości modulacji światła lasera pompującego.

Procedura wyznaczania rozkładów czasu życia

nośników oraz koncentracji pułapek na płytce jest następująca:

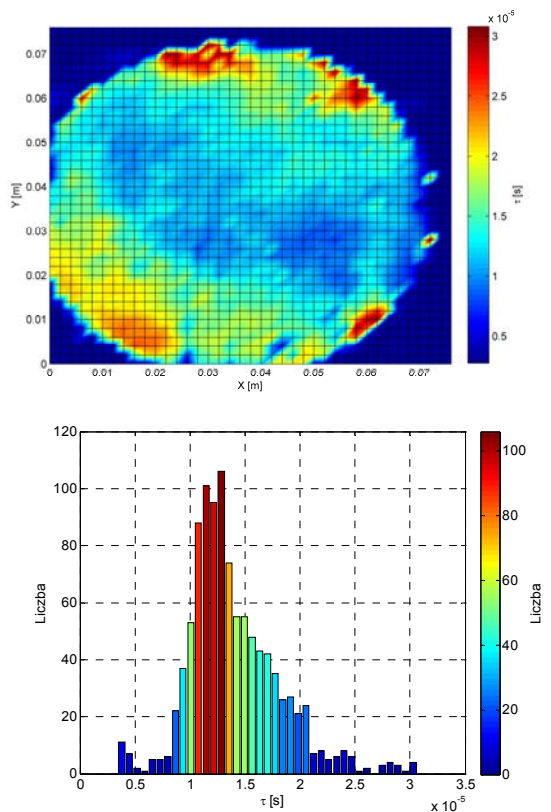
a) pomiar rozkładu amplitudy sygnału MFCA na próbce, b) pomiar charakterystyki częstotliwościowej amplitudy sygnału MFCA w dwóch wybranych punktach płytki celem wyznaczenia krzywej kalibracyjnej tj. zależności liniowej czasu życia nośników i amplitudy sygnału MFCA, c) przeliczenie mapy amplitudowej na mapę czasu życia z wykorzystaniem wyznaczonej krzywej kalibracyjnej, d) obliczenie mapy koncentracji pułapek w próbce.

Mapę tak uzyskanego rozkładu czasów życia $\tau(x,y)$ dla zbadanej płytki krzemowej bez podświetlania przedstawiono na rysunku 3.

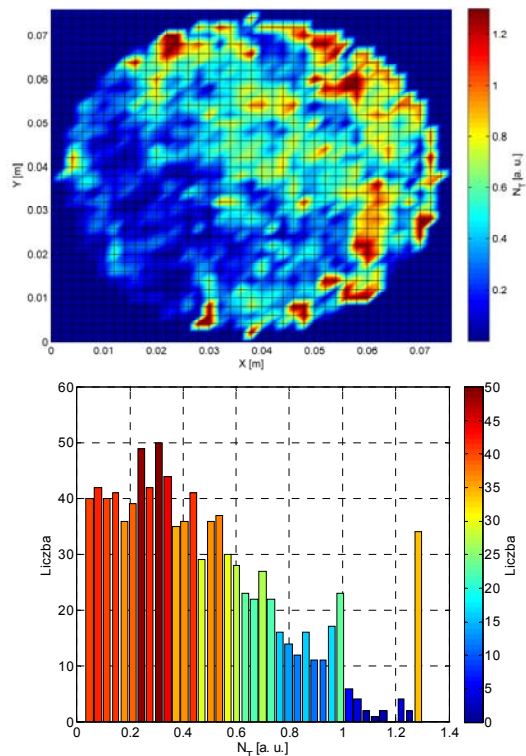


Rys. 3. Mapa czasów życia $\tau(x,y)$ oraz histogram badanej płytki krzemowej typu p (bez podświetlenia)

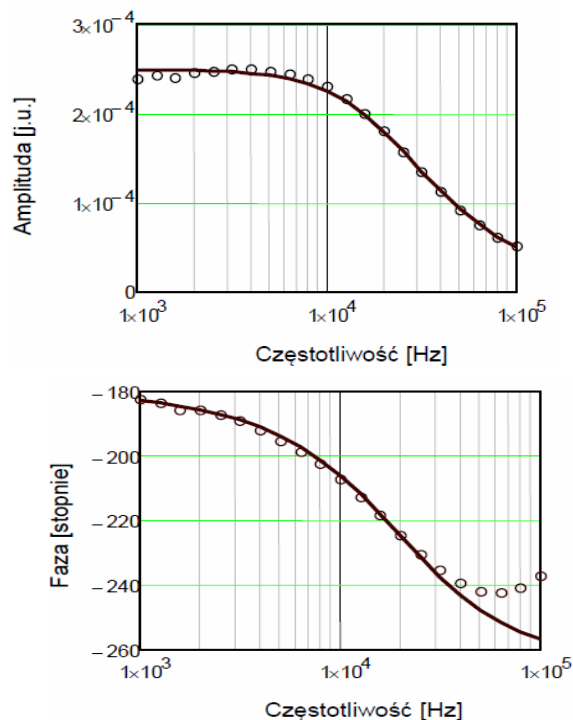
Z histogramu można odczytać, iż największy obszar płytki wykazuje czas życia 8 μ s. Mapę uzyskanego rozkładu czasów życia $\tau(x,y)$ dla zbadanej płytki krzemowej z podświetleniem przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Mapa czasów życia $\tau(x,y)$ oraz histogram zbadanej płytki krzemowej (z podświetleniem)



Rys. 5. Mapa rozkładu oraz histogram koncentracji defektów w płytce



Rys. 6. Teoretyczne (linia ciągła) i eksperymentalne charakterystyki (kółka) amplitudowe i fazowe sygnału MFCA zmierzone w wybranym punkcie badanej płytki krzemowej. Najlepsze dopasowanie uzyskano dla wartości czasu życia $\tau = 11 \mu$ s

Z histogramu można odczytać, iż największy obszar płytki wykazuje wydłużony czas życia 13 μ s. Z porównania obu map rozkładów życia uzyskać można rozkład koncentracji defektów, które powodowały skrócenie czasu życia nośników. Można wykazać, iż mapę koncentracji defektów oblicza się z zależności (5)

$$(5) \quad \Delta N(x, y) = A \cdot \left(\frac{1}{\tau_1(x, y)} - \frac{1}{\tau_2(x, y)} \right)$$

gdzie $\tau_1(x,y)$ oraz $\tau_2(x,y)$ są rozkładami czasów życia dla próbek zmierzonej odpowiednio bez i z podświetlaniem, A jest współczynnikiem proporcjonalności.

Tak uzyskaną mapę rozkładu pułapek przedstawiono na rysunku 5.

Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe sygnału MFCA zmierzone w określonym punkcie płytki w celu uzyskania zależności amplituda - czas życia przedstawiono na rysunku 6.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe do wyznaczania rozkładu czasów życia nośników na płytce krzemu z wykorzystaniem metody MFCA. Pomiarowi podlega rozkład amplitudy sygnału MFCA dla określonej częstotliwości modulacji. Po wykonaniu pomiarów częstotliwościowych amplitudy i fazy sygnału MFCA w wybranym punkcie płytki wyznaczono krzywą kalibracyjną zależności amplitudy sygnału od czasu życia nośników. Po uwzględnieniu krzywej kalibracyjnej przeliczono mapy amplitudy sygnału MFCA na mapy czasu życia. Przedstawiono też sposób wyznaczania rozkładu koncentracji pułapek obniżających czasy życia w próbkach z mapek czasów życia przed i po naświetleniu próbki dodatkowym światłem.

LITERATURA

- [1] Warta W., Defect and impurity diagnostics and process monitoring, *Solar Energy and Solar Cells* 72, 2002, 389-401
- [2] Schroeder D., Some Recent Advances in Contactless Silicon Characterization, *ECS Transactions* 3(4), 2006, 321-337
- [3] Dietzel D., Gibkes J., Chotikaprakhan S., Bein B.K., Pelz J., Radiometric Analysis of Laser Modulated IR Properties of Semiconductors, *International Journal of Thermophysics* 24(3), 2003, 741-755
- [4] Glut S.W., Warta W., High-resolution lifetime mapping using modulated free-carrier absorption, *Journal of Applied Physics* 77 (7), 1995, 3243-3247
- [5] Chrobak Ł., Maliński M., Zastosowanie zjawiska modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych do nieniszczących badań materiałów półprzewodnikowych, *Elektronika - technologie, konstrukcje, zastosowania* LIII(12), 2012, 110-113
- [6] Chrobak Ł., Maliński M., Badania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki MFCA opartej na zjawisku modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki* 3, 2011, 39-47
- [7] Maliński M., Chrobak Ł., Bychto L., Pawlak M., Investigations of the Implanted Layer in Silicon Based on the Modulated Free Carrier Absorption Phenomenon, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektroniki i Informatyki* 5, 2013, 17-22
- [8] 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* LV(9), 2014, 70-72
- [9] 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

- [10] 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
- [11] Li B., Li X., Li W., Huang Q., Zhang X., Accurate determination of electronic transport properties of semiconductor wafers with spatially resolved photo-carrier techniques, *Journal of Physics: Conference Series* 2014, 2010, 012013
- [12] Zhang X., Li B., Gao C., Analysis of free carrier absorption measurement of electronic transport properties of silicon wafers, *European Physics Journal Special Topics* 153, 2008, 279-281
- [13] Huang Q., Li B., Liu X., Influence of probe beam size on signal analysis of modulated free carrier absorption technique, *Journal of Physics: Conference Series* 214, 2010, 012084
- [14] Li W., Li B., Analysis of modulated free-carrier absorption measurement of electronic transport properties of silicon wafers, *Journal of Physics: Conference Series* 214, 2010, 012116
- [15] Mandelis A., Balista J., Shaughnessy D., Infrared photocarrier radiometry of semiconductors: Physical principles, quantitative depth profilometry, and scanning imaging of deep subsurface electronics defects, *Physical Review B* 67, 2003, 205208
- [16] Schmidt J., Measurement of differential and actual recombination parameters on crystalline silicon wafers, *IEEE Transactions on Electron Devices* 46(10), 1999, 2018-2025
- [17] Creazzo T., Redding B., Marchena E., Shi S., Prater D.W., Free-carrier absorption modulation in silicon nanocrystal slot waveguides, *Optics Letters* 35(21), 2010, 3691-3693
- [18] Huang Q., Li B., Self-eliminating instrumental frequency response from free carrier absorption signals for silicon wafer characterization, *Review of Scientific Instruments* 82, 2011, 043104
- [19] Huang Q., Li B., Electronic transport characterization of silicon wafers by combination of modulated free carrier absorption and photocarrier radiometry, *Journal of Applied Physics* 109, 2011, 023708
- [20] Dramicanin M.D., Ristovski Z.D., Nikolic P.M., Vasilievic D.G., Todorovic D.M., Photoacoustic investigation of transport in semiconductors: Theoretical and experimental study of a Ge single crystal, *Physical Review B* 51(20), 1995, 14226-14232

Autorzy: dr hab. inż. Mirosław Maliński, prof. PK, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin; dr inż. Leszek Bychto, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin; dr inż. Łukasz Chrobak, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin; dr inż. Wiesław Madej, Politechnika Koszalińska, Wydział Elektroniki i Informatyki, ul. JJ Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, E-mail: madej@ie.tu.koszalin.pl.