

Łukasz Bartłomiej Chrobak

Mirosław Andrzej Maliński

Katedra Podstaw Elektroniki

Wydział Elektroniki i Informatyki

Politechnika Koszalińska

ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

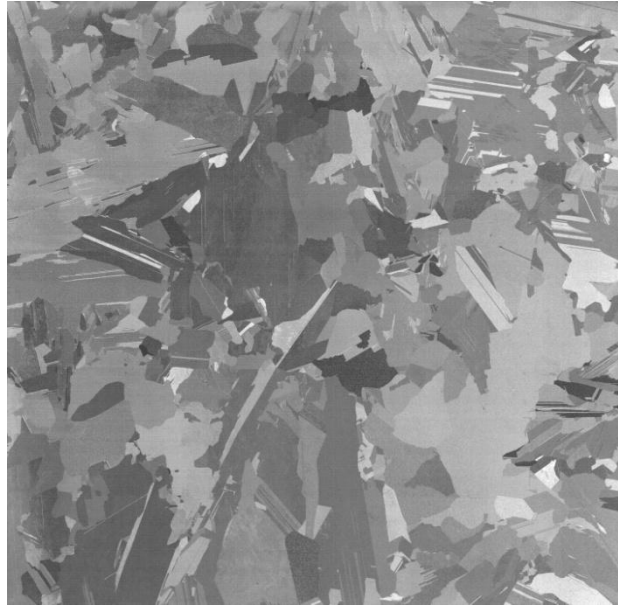
Badania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych z wykorzystaniem nieniszczącej techniki MFCA opartej na zjawisku modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych

Wstęp

Parametry rekombinacyjne materiałów krzemowych są jednymi z ważniejszych, których znajomość jest niezbędna przy projektowaniu urządzeń optoelektronicznych (np. ogniw słonecznych, detektorów, itp.). W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania nieniszczącymi metodami do wyznaczania parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych [1-4]. Jedną z nich jest metoda MFCA (ang. Modulated Free Carrier Absorption), która umożliwia wyznaczenie czasu życia nośników, współczynnika dyfuzji nośników, a także prędkości ich rekombinacji powierzchniowej. Jej podstawy teoretyczne, a także przykładowe charakterystyki częstotliwościowe amplitudowe i fazowe uzyskane na płytkach krzemowych przedstawiono w pracy [5]. Modyfikację metody MFCA opartą na przestrzennej separacji wiązki wzbudzającej nośniki i wiązki sondującej przedstawiono w pracach [6,7]. Wpływ szerokości wiązki sondującej na sygnał MFCA przedstawiono w pracy [8]. Porównanie czułości dwóch odmian metody MFCA opartych na pomiarze sygnału MFCA w funkcji częstotliwości modulacji oraz w funkcji odległości wiązki wzbudzającej i wiązki sondującej przedstawiono w pracy [9]. Rozkład przestrzenny nośników w modelu 3D niezbędny do obliczeń wielkości sygnału MFCA przedstawiono w pracy [10]. Wyniki badań, porównujących metodę MFCA z metodą pomiarową bazującą na wykorzystaniu mikrofal, zweryfikowane pomiarami fotokonduktancji przedstawiono w pracy [11]. Przedstawione w niniejszej pracy zagadnienia dotyczące metody MFCA są ciągle aktualne i znajdują się w spektrum zainteresowań naukowców z międzynarodowych jednostek naukowych [12-14].

Metodologia pomiarów i rozważania teoretyczne

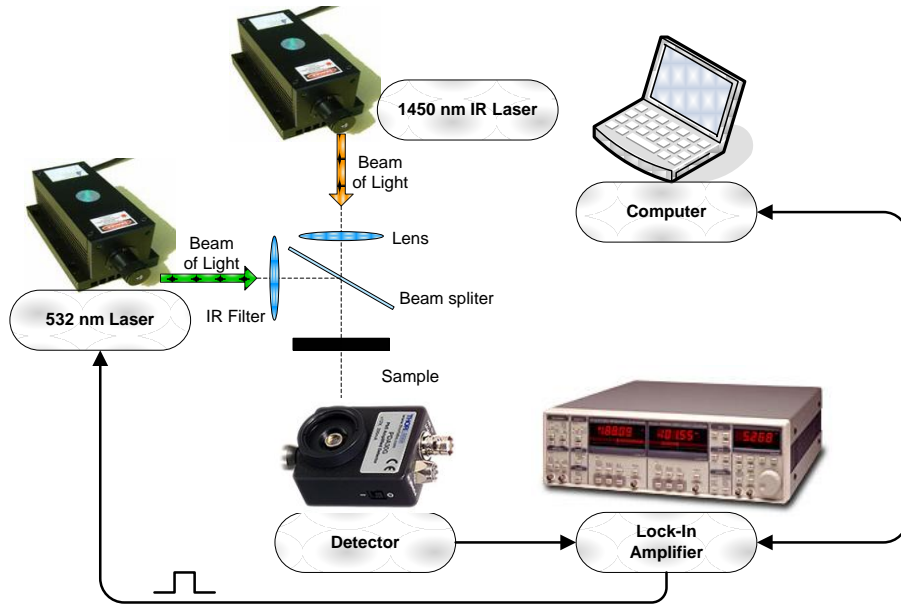
Znajomość parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych jest wysoce pożądana, zwłaszcza przy projektowaniu i wytwarzaniu ogniw słonecznych. Przykładowe zdjęcie płytki krzemowej wykorzystanej do badań przedstawiono na Rys.1.



Rys.1. Widok płytki krzemowej wykorzystywanej przy produkcji ogniw słonecznych (Dzięki uprzejmości Berlin Solar).

Idea metody MFCA polega na wzbudzeniu nośników z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa w wyniku absorpcji światła lasera wzbudzającego oświetlającego próbkę. W wyniku tego uzyskuje się dyfuzyjne fale plazmowe w próbce, a więc fale gęstości ładunku. Następnie rejestruje się natężenie wiązki sondującej przechodzącej (w bliskiej podczerwieni) przez próbkę. Dla krótszej długości fali niż długość odpowiadająca przerwie energetycznej badanego materiału, prawie cała energia zostanie zaabsorbowana, co powoduje generację nośników swobodnych w paśmie przewodnictwa. Natężenie światła lasera sondującego (pracującego na długości fali większej niż odpowiadająca długość fali przerwy energetycznej) przechodzącego przez próbkę, ze względu na absorpcję na nośnikach swobodnych w paśmie przewodnictwa, będzie mniejsze proporcjonalnie do koncentracji nośników swobodnych wygenerowanych światłem lasera wzbudzającego. Zatem sygnał transmisji światła lasera podczerwonego, przy zmodulowanej natężeniowo wiązce światła lasera wzbudzającego, jest zmodulowany w wyniku periodycznie zmiennej koncentracji nośników, powodującej periodyczną zmianę absorpcji światła na nośnikach swobodnych.

W skład stanowiska pomiarowego wchodziły dwa lasery półprzewodnikowe. Jeden z nich modulowany natężeniowo w dziedzinie częstotliwości i pracujący na długości fali 532 nm pełniący rolę lasera pompującego nośniki z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa oraz laser półprzewodnikowy pracujący w trybie ciągłym na długości fali 1450 nm (bliska podczerwień) pełniący rolę lasera sondującego. Za pomocą precyzyjnej optyki, oba strumienie były skupiane dokładnie w tym samym punkcie na próbce. Natężenie przechodzącego strumienia światła podczerwonego było rejestrowane za pomocą szybkiego detektora firmy Thorlabs® z serii PDA. Zarejestrowany sygnał podawany był na dwukanałowy wzmacniacz fazoczuły (Stanford Research SR 830), pełniący również rolę generatora przebiegu modulującego dla lasera pompującego. Całe stanowisko było sterowane z wykorzystaniem algorytmów sterujących zaimplementowanych w aplikacji napisanej w języku wysokiego poziomu C++. Schemat stanowiska pomiarowego do badań metodą MFCA przedstawiono na Rys.2.



Rys.2. Schemat stanowiska eksperymentalnego do nieniszczących badań parametrów rekombinacyjnych materiałów optoelektronicznych z wykorzystaniem techniki zmodulowanej absorpcji (MFCA) na swobodnych nośnikach.

Zależność na amplitudę i fazę sygnału MFCA w dziedzinie częstotliwości, który jest wprost proporcjonalny do rozkładu przestrzennego ładunku w próbce, obliczane były według wzorów przedstawionych poniżej.

$$Amp(f, \tau, D, V_1, V_2) = |\theta(f, \tau, D, V_1, V_2)| \quad (1)$$

$$Phase(f, \tau, D, V_1, V_2) = \frac{180}{\pi} (\theta(f, \tau, D, V_1, V_2)) \quad (2)$$

$$\theta(f, \tau, D, V_1, V_2) = 1 - a \int_0^d \delta n(x) dx \quad (3)$$

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

$$Le(f, \tau) = \left[\frac{D\tau}{1 + i\omega(f)\tau} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$K(f, \tau) = \frac{I_0}{2ED} \frac{\beta}{\beta^2 - [Le(f, \tau)]^{-2}} \quad (6)$$

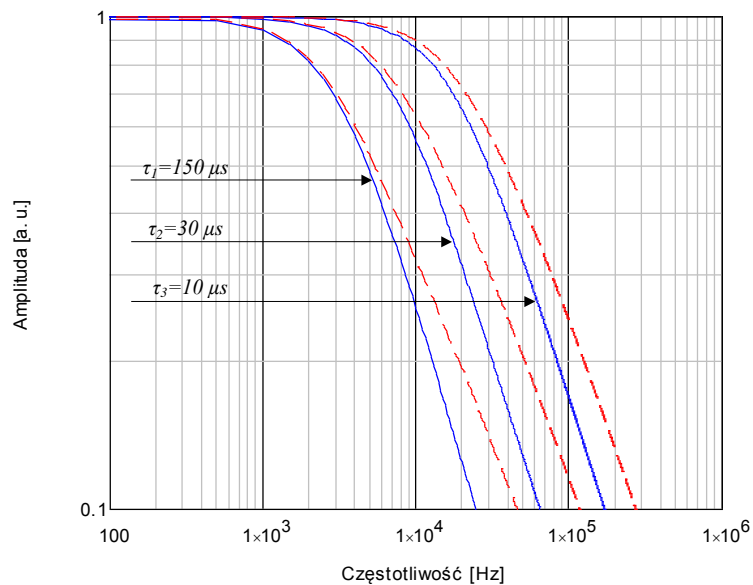
$$\varepsilon_b(f, \tau, V_2) = \frac{D}{V_2 Le(f, \tau)} \quad \varepsilon_g(f, \tau, V_1) = \frac{D}{V_1 Le(f, \tau)} \quad (7)$$

$$\eta_b(f, \tau, V_2) = \varepsilon_b(f, \tau, V_2) \beta Le(f, \tau) \quad \eta_g(f, \tau, V_1) = \varepsilon_g(f, \tau, V_1) \beta Le(f, \tau) \quad (8)$$

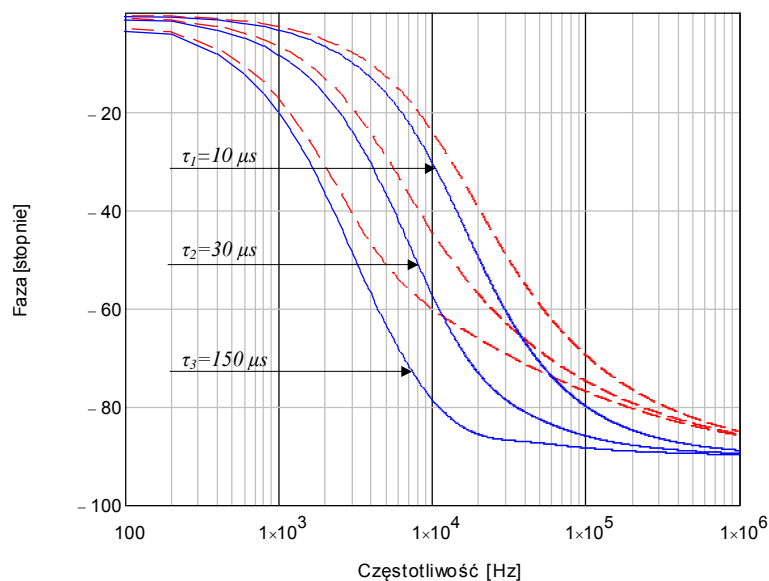
$$B_1(f, \tau, D, V_1, V_2) = \frac{\left[\eta_g(f, \tau, V_1) + 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) - 1 \right] e^{\frac{-d}{Le(f, \tau)}} - \left[\eta_b(f, \tau, V_2) - 1 \right] \left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) + 1 \right] e^{-\beta d}}{\left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) + 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) + 1 \right] e^{\frac{d}{Le(f, \tau)}} - \left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) - 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) - 1 \right] e^{-\beta d}} \quad (9)$$

$$B_2(f, \tau, D, V_1, V_2) = \frac{\left[\eta_g(f, \tau, V_1) + 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) + 1 \right] e^{\frac{d}{Le(f, \tau)}} - \left[\eta_b(f, \tau, V_2) - 1 \right] \left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) - 1 \right] e^{-\frac{d}{Le(f, \tau)}}}{\left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) + 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) + 1 \right] e^{\frac{d}{Le(f, \tau)}} - \left[\varepsilon_g(f, \tau, V_1) - 1 \right] \left[\varepsilon_b(f, \tau, V_2) - 1 \right] e^{-\frac{d}{Le(f, \tau)}}} \quad (10)$$

Na dwóch kolejnych rysunkach (Rys.3. oraz Rys.4.) przedstawione zostały wyniki symulacji charakterystyk amplitudowych i fazowych sygnału MFCA dla trzech różnych wartości czasów życia nośników. Symulacje przeprowadzone zostały według modelu przedstawionego powyżej. Wartości parametrów przyjęte do symulacji były następujące: $D=15 \text{ cm}^2/\text{s}$ (współczynnik dyfuzji nośników dla materiałów krzemowych typu p), prędkości rekombinacji powierzchniowych od strony polerowanej i szlifowanej kolejno $V_B=100 \text{ cm/s}$, $V_G=1500 \text{ cm/s}$ oraz grubość próbki $d=0.63 \text{ cm}$.



Rys.3. Teoretyczne charakterystyki amplitudowe sygnału MFCA dla trzech różnych wartości czasu życia nośników. Linia niebieska odpowiada wzbudzeniu próbki od strony polerowanej, natomiast linia czerwona od strony szlifowanej. Wartości poszczególnych parametrów przyjętych do symulacji: $d=0.63 \text{ cm}$, $D=15 \text{ cm}^2/\text{s}$, $V_G=1500 \text{ cm/s}$, $V_B=100 \text{ cm/s}$.



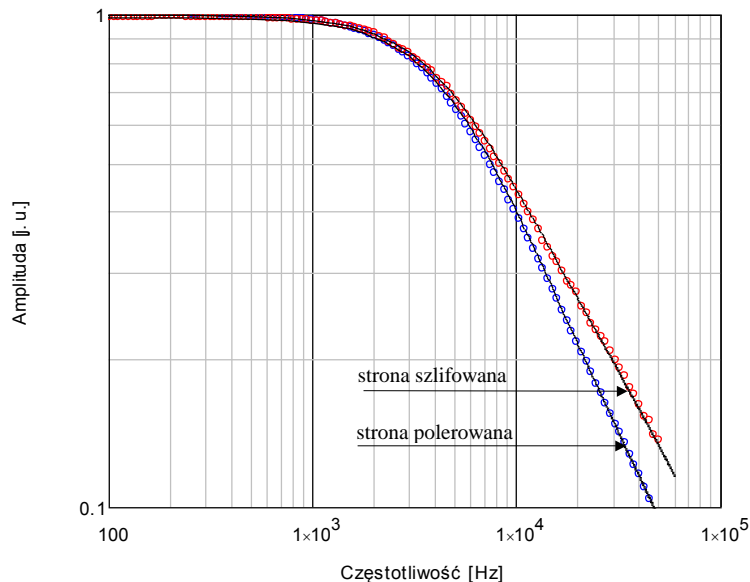
Rys.4. Teoretyczne charakterystyki fazowe sygnału MFCA dla trzech różnych wartości czasu życia nośników. Linia niebieska odpowiada wzbudzeniu próbki od strony polerowanej, natomiast linia czerwona od strony szlifowanej. Wartości poszczególnych parametrów przyjętych do symulacji: $d=0.63$ cm, $D=15$ cm²/s, $V_G=1500$ cm/s, $V_B=100$ cm/s.

Z przedstawionych powyżej charakterystyk teoretycznych, można wywnioskować, że możliwe jest określenie parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych z charakteru przebiegów sygnału MFCA. Warto zwrócić uwagę na fakt, że metoda ta (podobnie jak metoda fotoakustyczna [15]) pozwala również określić prędkości rekombinacji powierzchniowej badanego materiału.

Wyniki eksperymentalne

Próbki poddane analizie, zostały uprzednio specjalnie przygotowane. Charakteryzowały się dwoma rodzajami powierzchni, a mianowicie jedna ze stron była polerowana, druga szlifowana. Pomiary zostały przeprowadzone w temperaturze pokojowej. Pomiary amplitudy i fazy sygnału MFCA zostały przeprowadzone w zakresie częstotliwości od 100 Hz do 50 kHz. Uzyskane wyniki eksperymentalne były poprawione na charakterystykę referencyjną toru pomiarowego.

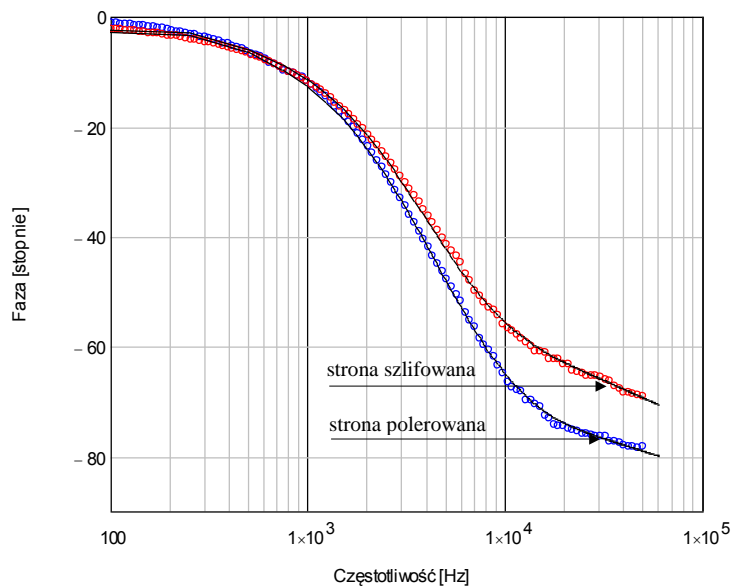
Doświadczalne i teoretyczne amplitudowe charakterystyki częstotliwościowe uzyskane na wybranej próbce krzemowej typu 'p' przedstawiono na Rys.5.



Rys.5. Amplitudowe charakterystyki teoretyczne i eksperymentalne sygnału MFCA dla próbki krzemowej o grubości $d=0.63$ cm. Kółka – wyniki eksperymentalne, linie ciągłe charakterystyki teoretyczne. Uzyskane wartości parametrów: $\tau=120$ μ s, $D=17$ cm²/s, $V_G=2046$ cm/s, $V_B=611$ cm/s.

Ekstrakcja poszukiwanych wartości parametrów rekombinacyjnych odbyła się przez zastosowanie techniki optymalizacji do dopasowania krzywych teoretycznych do wyników doświadczalnych. Procedura ta realizowana była dwustopniowo, a mianowicie pierwszy uzyskany wynik podstawiany był jako punkt startowy do ponownego procesu optymalizacji. Uzyskane wartości parametrów były następujące: $\tau=120$ μ s, $D=17$ cm²/s, $V_G=2046$ cm/s, $V_B=611$ cm/s.

Doświadczalne i teoretyczne fazowe charakterystyki częstotliwościowe uzyskane na tej samej próbce krzemowej typu 'p' przedstawiono na Rys.6.



Rys.6. Fazowe charakterystyki teoretyczne i eksperymentalne sygnału MFCA dla próbki krzemowej o grubości $d=0.63$ cm. Kółka – wyniki eksperymentalne, linie ciągłe charakterystyki teoretyczne. Uzyskane wartości parametrów: $\tau=120$ μ s, $D=17$ cm^2/s , $V_G=2046$ cm/s, $V_B=611$ cm/s.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono nieniszczącą metodę MFCA do badań parametrów rekombinacyjnych materiałów optoelektronicznych, opartą na zjawisku modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych. Uzyskane wyniki są zgodne z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu metody fotoakustycznej. Potwierdza to poprawność i celowość stosowanych obydwu metod. Metoda MFCA w znacznie przystępniejszy sposób (w porównaniu z metodą fotoakustyczną) umożliwia badania całych płytek krzemowych mające na celu sporządzanie tzw. mapy rozkładu czasów życia nośników.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy numer N N515604339.

Bibliografia

- [1] Warta W., *Defect and impurity diagnostics and process monitoring*, „Solar Energy and Solar Cells” 2002, No 72, s. 389-401.
- [2] Berman G. M., Call N. J., Johnson S. W., Ahrenkiel R. K., Rotolante R.A., *A comparison of transient and imaging techniques for measuring*, „18th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes” 2008, s. 151-154.
- [3] Johnston S.W., Call N. J., Phan B., Ahrenkiel R. K., *Applications of imaging techniques for solar cell characterization*, „34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference” 2009, s. 276-281.
- [4] Schroeder D., *Some Recent Advances in Contactless Silicon Characterization*, “ECS Transactions” 2006, No 3 (4), s. 321-337.
- [5] Dietzel D., Gibkes J., Chotikaprakhan S., Bein B. K., Pelz J., *Radiometric Analysis of Laser Modulated IR Properties of Semiconductors*, „International Journal of Thermophysics” 2003, No 24 (3), s. 741-755.

- [6] 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” 2010, No 214, s. 012013.
- [7] Zhang X., Li B., Gao C., *Analysis of free carrier absorption measurement of electronic transport properties of silicon wafers*, “European Physics Journal Special Topics” 2008, No 153, s. 279-281.
- [8] 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” 2010, No 214, s. 012084.
- [9] Li W., Li B., *Analysis of modulated free-carrier absorption measurement of electronic transport properties of silicon wafers*, “Journal of Physics: Conference Series” 2010, No 214, s. 012116.
- [10] 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” 2003, No B 67, s. 205208.
- [11] Schmidt J., *Measurement of differential and actual recombination parameters on crystalline silicon wafers*, “IEEE Transactions on Electron Devices” 1999, No 46 (10), s. 2018-2025.
- [12] Creazzo T., Redding B., Marchena E., Shi S., Prater D. W., *Free-carrier absorption modulation in silicon nanocrystal slot waveguides*, “Optics Letters” 2010, No 35 (21), s. 3691-3693.
- [13] Huang Q., Li B., *Self-eliminating instrumental frequency response from free carrier absorption signals for silicon wafer characterization*, “Rev. Sci. Instrum.” 2011, No 82, s. 043104.
- [14] Huang Q., Li B., *Electronic transport characterization of silicon wafers by combination of modulated free carrier absorption and photocarrier radiometry*, “J. Appl. Phys.” 2011, No 109, s. 023708.
- [15] Malinski M., Chrobak Ł., Patryn A., *Theoretical and Experimental Studies of a Plasma Wave Contribution to the Photoacoustic Signal for Si Samples*, “Acta Acustica united with Acustica” 2009, No 95, s. 60-64.

Streszczenie

W pracy przedstawiono rozważania teoretyczne i wyniki eksperymentalne badań parametrów rekombinacyjnych materiałów krzemowych z wykorzystaniem techniki MFCA. Wykorzystana technika badawcza bazuje na zjawisku modulacji absorpcji na nośnikach swobodnych.

Abstract

This paper presents theoretical and experimental results of investigations of the recombination parameters of the silicon materials with the MFCA method. The applied technique is based on the phenomena of the modulated free carriers absorption.