

Aparaturowe ograniczenia pomiaru kinetyki pojemności w metodzie DLTS

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej DLTS stosowaną do badania centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych niskorezystywnych. Wskazano ograniczenia procesu pomiaru niestacjonarnych przebiegów pojemności próbek przy zastosowaniu w systemie pomiarowym typowych, fabrycznych mierników pojemności na przykładzie miernika Boonton 7200. Zaproponowano dodatkową głowicę do miernika umożliwiającą wykonanie pomiarów w szerokim zakresie czasów pobudzeń próbki, do zakresu submikrosekundowego włącznie. Przedstawiono procedurę korekcy nieliniowości wprowadzanych przez ten układ.

Abstract. This article presents deep level transient spectroscopy (DLTS) applied as a tool of investigation of low resistive semiconductor materials. In this contribution we focus on limitations of measurement of capacitance kinetics performed by means of ready-made meters. In our case Boonton 7200 capacitance meter was used. Additional unit placed at the meter's input was designed. The unit allows to extend range of duration of excitant pulses. Measurements with pulses shorter than microsecond and longer than minutes were possible. A procedure of correction of nonlinearity introduced by additional unit was described. (**Apparatus limitations of measuring capacitance kinetics in DLTS method**)

Słowa kluczowe: niestacjonarna spektroskopii pojemnościowa, DLTS, centra defektowe, pomiary pojemności.

Keywords: deep-level transient spectroscopy, DLTS, defect center, capacitance measurements.

doi:10.12915/pe.2014.08.49

Wstęp – metoda niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej DLTS

Najczęściej stosowaną metodą badania struktury defektowej półprzewodników niskorezystywnych jest niestacjonarna spektroskopii pojemnościowa (DLTS) [1]. W metodzie tej próbka materiału półprzewodnikowego ma postać złącza MS (ang. *Metal-Semiconductor*), w którym obsadzenie poziomów defektowych w strefie zubożonej określa jego pojemność. Metoda DLTS wykorzystuje zjawisko wychwytu i termicznej emisji nośników ładunku z głębokich centrów defektowych, przy czym proces zaburzenia równowagi obsadzenia poziomów defektowych odbywa się poprzez impuls elektryczny. Proces ten można obserwować jako relaksację pojemności złącza po wyłączeniu impulsu napięcia. Zatem mierząc relaksację pojemności próbki otrzymuje się informację o centrach defektowych znajdujących się w badanym materiale.

Przyjmuje się, że relaksacja pojemności, zarejestrowana w zadanej temperaturze T , ma charakter przebiegu eksponencjalnego, w postaci [1]

$$(1) \quad \Delta C(t, T) = \Delta C(0) \exp[-e_T(T)t],$$

przy czym $\Delta C(0)$ jest zmianą pojemności w chwili początkowej, zależną od amplitudy impulsu napięcia polaryzującego. Odwrotność stałej czasowej tego przebiegu $e_T(T)$ określa szybkość emisji nośników ładunku z centrum defektowego. Na podstawie przebiegów pojemności zarejestrowanych w szerokim zakresie temperatur, wyznaczana jest eksperymentalna temperaturowa zależność szybkości emisji $e_T(T)$ dla każdego z zaobserwowanych centrów defektowych. Temperaturowa zależność szybkości emisji opisana jest równaniem Arrheniusa w postaci

$$(2) \quad e_T(T) = AT^2 \exp[-E_a/k_B T],$$

gdzie E_a jest energią aktywacji centrum defektowego, A - parametrem równym iloczynowi przekroju czynnego na wychwyty nośników ładunku i stałej materiałowej, a k_B - stałą Boltzmann. Zależność (2) oraz wartości parametrów E_a i A jednoznacznie charakteryzują zaobserwowane centrum defektowe.

Do wyznaczenia temperaturowych zależności szybkości emisji nośników ładunku początkowo stosowana była procedura korelacyjna [1,2,3]. Procedurę tę realizowano

sprzętowo przy użyciu układu lock-in np. w miernikach DLS81 i DLS82, opracowanych przez G. Ferenczi'ego w latach 1980-1982 [4,5]. Są one wykorzystywane obecnie w wielu laboratoriach. Rozwój technik komputerowych spowodował, że relaksacyjne przebiegi pojemności rejestrowane są teraz w postaci cyfrowej i parametry centrów defektowych uzyskiwane są w wyniku obliczeń numerycznych.

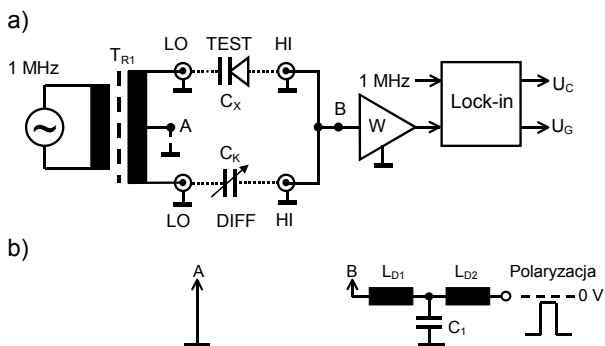
Najlepszą rozdzielczość, tzn. możliwość wykrycia centrów defektowych o zbliżonych parametrach, uzyskuje się przy zastosowaniu procedury wykorzystującej odwrotne przekształcenie Laplace'a [6]. Relaksacyjny przebieg fotoprądu opisuje się wtedy równaniem całkowym Fredholma o ogólnej postaci

$$(3) \quad \Delta C(t, T_j) = \int_0^{\infty} S_{L_j}(e_T) \exp(-e_T t) de_T,$$

gdzie $S_{L_j}(e_T)$ jest jednowymiarową funkcją gęstości widma dla ustalonej temperatury T_j . Bazując na równaniu (3) L. Dobaczewski opracował metodę LDLTS (Laplace-DLTS) i zaproponował instrumentarium pomiarowe do jej realizacji [7]. Jako przetwornik pojemność-napięcie został przewidziany produkowany obecnie miernik pojemności firmy Boonton 7200 [8]. Na podstawie opisów systemów pomiarowych DLTS publikowanych w literaturze można stwierdzić, że jest on najczęściej stosowanym miernikiem w laboratoriach badających centra defektowe w materiałach półprzewodnikowych. Przyrząd ten jest miernikiem uniwersalnym, stąd zastosowanie go w systemach DLTS ma szereg ograniczeń [9]. Zjawiska fizyczne występujące podczas pomiarów metodą spektroskopii pojemnościowej DLTS oraz stosowane metody obliczeniowe są szeroko opisane w literaturze. Natomiast opisów układów mierników pojemności jest niewiele, są trudno dostępne [10] i zazwyczaj dotyczą rozwiązań układowych mierników poprzednich generacji [11,12]. Celem niniejszej pracy jest wskazanie ograniczeń stosowania miernika Boonton 7200 w systemach pomiarowych DLTS oraz zaproponowanie rozwiązań układowych umożliwiających rozszerzenie możliwości pomiarowych tego miernika. Zaproponowane rozwiązanie będzie zilustrowane wynikami pomiarów przebiegów czasowych napięć w wybranych punktach układu. Przedstawione rozważania mają charakter ogólny i mogą być pomocne przy konstrukcji dedykowanych mierników pojemności.

Przetwornik pojemność-napięcie w systemie pomiarowym DLTS

Przetwornik pojemność-napięcie stosowany w systemach pomiarowych DLTS musi spełnić dwa podstawowe wymagania: umożliwić pomiary bardzo małych zmian pojemności próbki (mniejszych od 1 pF) oraz zapewnić możliwość impulsowej zmiany jej napięcia polaryzacji. Mierniki takie budowane są zazwyczaj w oparciu o strukturę mostkową sterowaną sygnałem pomiarowym o częstotliwości 1 MHz [8]. Typową strukturę miernika pojemności przedstawiono na rysunku 1a. Badana próbka, oznaczona przez C_X , jest umieszczona w kriostatcie i dołączona do miernika za pośrednictwem gniazd wejściowych TEST HI i LO. Do drugiej pary gniazd wejściowych DIFF HI i LO dołączony jest kondensator kompensujący C_K , zazwyczaj sterowany komputerowo. Zadaniem tego kondensatora jest równoważenie mostka, gdyż w stanie równowagi można rejestrować niewielkie zmiany pojemności próbki w odniesieniu do jej wartości średniej. Następnie sygnał jest wzmacniany za pomocą wzmacniacza W i podawany na wejście woltomierza fazoczułego typu lock-in.



Rys. 1. Miernik pojemności Boonton 7200 [8]. a) Uproszczony schemat ideowy miernika. Widoczny jest układ mostkowy, gdzie C_X oznacza pojemność złącza MS próbki, C_K jest pojemnością kompensującą. Napięcie U_C jest proporcjonalne do pojemności próbki, - U_G do jej przewodności. b) Obwód polaryzacji próbki. Obwód dołączony jest do punktów A i B na rysunku 1a.

Na wyjściu woltomierza otrzymywane są sygnały U_C i U_G proporcjonalne odpowiednio do składowej pojemnościowej i przewodnościowej admittancji mierzonej próbki. Sygnały wyjściowe są następnie cyfryzowane i przetwarzane w komputerze.

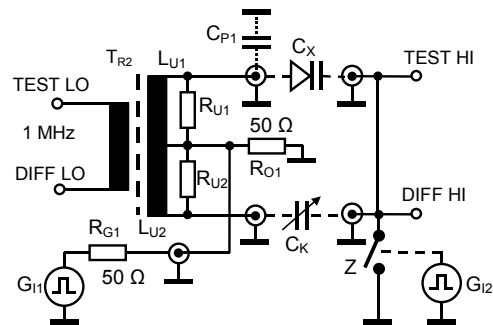
W układzie mostka pomiarowego obwód polaryzacji może być dołączony w punktach oznaczonych etykietami A i B na rysunku 1a. Typowy obwód polaryzacji zastosowany w mierniku Boonton 7200 przedstawiono na rysunku 1b [8]. Punkt A dołączony jest do masy miernika, napięcie polaryzujące doprowadzone jest do punktu B i może być generowane z zasilacza wewnętrznego albo źródła zewnętrznego. Przedstawione rozwiązanie ma szereg ograniczeń. Podawanie impulsu napięcia bezpośrednio na wejście wzmacniacza W powoduje jego przesterowanie. Wzmacniacz dopiero po czasie ok. 300 μ s wraca do liniowego zakresu pracy. Właściwość ta jest opisywana w wielu publikacjach [9,13]. Zarejestrowany w tym czasie odcinek przebiegu pojemności jest zaburzony i musi być pominięty w dalszej analizie. Ograniczenie to można zminimalizować poprzez zmniejszenie szybkości narastania impulsu polaryzującego. Dla miernika 7200 zalecana szybkość nie powinna przekraczać 20V/ms [13].

Można również zauważyć, że układ mostka pomiarowego wraz z obwodem polaryzacji przedstawiony na rysunku 1ab zawiera szereg obwodów RLC drugiego

rzędu. Obwody takie charakteryzują się oscylacyjnymi stanami przejściowymi po pobudzeniu impulsowym. Z analizy działania układu wynika, że lepsze właściwości ma konfiguracja, w której napięcie polaryzacji przykładane jest w punkcie A, odseparowanym od wejścia wzmacniacza W. Producent miernika Boonton 7200 zaproponował dodatkową, zewnętrzną głowicę realizującą tę ideę [13]. Głowica dołączana jest do zacisków TEST HI i LO oraz DIFF HI i LO miernika. Proponowany układ nie zawiera obwodu kompensacji. Stąd możliwości pomiaru względnie małych (>1%) zmian pojemności próbki mogą być obciążone dużym błędem. Również szerokość impulsu napięcia nie może być mniejsza od praktycznie kilkudziesięciu mikrosekund. W wielu eksperymentach wymagane są szerokości impulsów napięcia mniejsze o trzy rzędy wielkości.

Głowica do pomiaru relaksacyjnych przebiegów pojemności próbki do miernika Boonton 7200

Modyfikacja obwodów wewnętrznych miernika Boonton 7200 nie zawsze jest możliwa np. ze względu na konieczność zachowania uniwersalności przyrządu. Dlatego do pomiarów kinetyki pojemności próbki zaproponowano zewnętrzną głowicę dołączaną do gniazd wejściowych miernika [5,13]. Schemat ideowy nowego układu przedstawiono na rysunku 2.



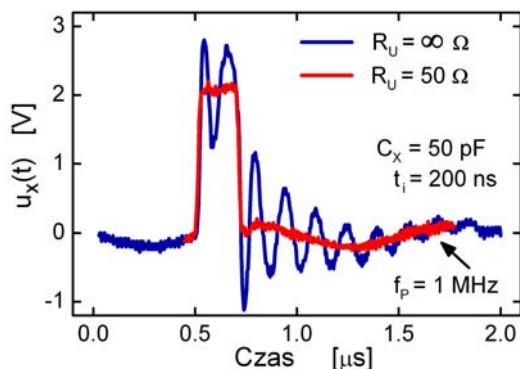
Rys. 2. Schemat ideowy głowicy do pomiaru kinetyki pojemności próbki C_X polaryzowanej napięciem z generatora impulsowego G_1 [5]. Klucz Z zwiera wejście wzmacniacza układu lock-in w mierniku 7200 w czasie trwania impulsu polaryzującego, jest sterowany z generatora G_2 . Generatory G_1 i G_2 są synchronizowane przez komputer. Pojemność C_{P1} modeluje pojemność kabla łączącego kriostat z głowicą

Układ ten, w porównaniu z rozwiązaniem proponowanym przez firmę Boonton, ma możliwość dołączenia kondensatora kompensującego oraz wykonania pomiarów przy minimalnej szerokości impulsu polaryzującego rzędu 100 ns. Impulsy polaryzujące dostarczane są z generatora zewnętrznego i przykładane w punkcie odpowiadającym punktowi A pokazanemu na rysunku 1a. Takie rozwiązanie umożliwia wykonanie pomiarów w szerokim zakresie szerokości impulsów polaryzujących do wartości dziesiątek sekund włącznie oraz ustalenie dowolnych wartości składowej stałej i amplitudy impulsu napięcia polaryzującego.

W opracowanym układzie wprowadzono również zwierać wejścia wzmacniacza W w postaci klucza zrealizowanego przy użyciu tranzystorów MOSFET, oznaczony etykietą Z na rysunku 2. Unika się wtedy możliwości przesterowania wzmacniacza wejściowego detektorów fazoczułych układu lock-in. Zrealizowany system pomiarowy sterowany jest z komputera klasy PC zawierającego kartę akwizycyjno-pomiarową firmy National Instruments PCI6251. Za pośrednictwem tej karty generowane są sygnały synchronizujące generator impulsów polaryzujących G_1 . W opracowanym systemie

pomiarowym DLTS zastosowano generator impulsów TABOR 8500. Parametry impulsów polaryzujących oraz temperatura próbki w kriostacie programowane są za pośrednictwem magistrali GPIB. Impulsy sterujące kluczem Z generowane są bezpośrednio z karty PCI6521. Do rejestracji niestacjonarnego przebiegu pojemności wykorzystano przetwornik A/C tej karty.

Istotnym problemem jest występowanie w układzie mostka z rysunku 2 obwodów RLC drugiego rzędu charakteryzujących się odpowiedzią oscylacyjną na pobudzenie impulsowe. Cechą impedancji tych obwodów są bieguny zespolone sprzężone położone w lewej półpłaszczyźnie. Obwody te tworzą indukcyjności uzwojeń transformatora L_U , pojemności próbki C_X i kabli połączeniowych z kriostatem C_P . Zarejestrowany przebieg czasowy napięcia na próbce o charakterze oscylacyjnym przedstawiono na rysunku 3. Można zauważyć, że amplituda oscylacji osiąga wartość ok. 50% amplitudy impulsu. W takim przypadku może nastąpić przepolaryzowanie próbki, co zniekształca wyniki eksperymentu. W celu uniknięcia odpowiedzi oscylacyjnych wprowadzono rezystancje tłumiące R_U równoległe do uzwojeń transformatora. Również obwody wejściowe miernika Boonton 7200 zbudowane są z elementów RLC, powodujących powstanie przebiegów oscylacyjnych tłumionych napięcia na próbce. Zwarcie klucza Z w czasie występowania impulsu polaryzującego pozwala na uniknięcie wpływu tych oscylacji.

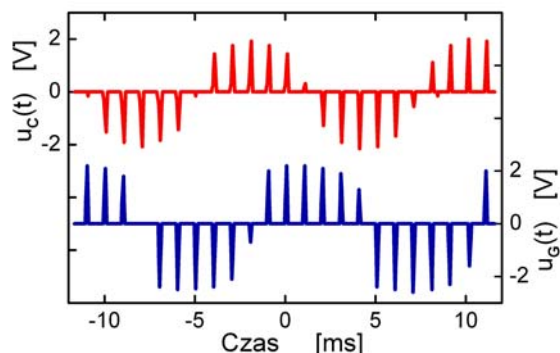


Rys. 3. Przebiegi czasowe napięcia U_X na próbce mierzone w głowicy pokazanej na rysunku 2. Ilustracja oscylacyjnych przebiegów czasowych w obwodach drugiego rzędu złożonych z indukcyjności uzwojeń transformatora L_U , pojemności próbki C_X i kabli połączeniowych z kriostatem C_P . Rezystancja R_U pełni rolę tłumiącą. Przebiegi zarejestrowano przy zwartym kluczu Z. Widoczny przebieg o częstotliwości 1 MHz.

Dodatkowym problemem występującym przy rejestracji relaksacyjnych przebiegów pojemności są stany przejściowe występujące w detektorach fazoczułych układu lock-in w mierniku Boonton 7200. Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane przebiegi czasowe napięć U_C i U_G na wyjściach miernika Boonton 7200 przy zwieraniu klucza Z. Przebiegi te zarejestrowano w warunkach całkowitego skompensowania pojemności próbki. Obrazują one odpowiedzi układów detektorów fazoczułych na impulsowe pobudzenie ich wejść. Przyczyną powstania tych zakłóceń może być przenoszenie się sygnału sterującego kluczem Z (przez pojemność bramka-dren tranzystora MOSFET) na wejścia detektorów. Kształt odpowiedzi zależy od przesunięcia fazy pomiędzy sygnałem referencyjnym a impulsem wejściowym.

Okres powtarzania impulsów sterujących kluczem Z, dla przebiegów przedstawionych na rysunku 4, wynosił ok. $T_P = 1$ ms i był bliski wielokrotności okresu sygnału

pomiarowego 1 MHz ($T_P \sim n \times 1 \mu s$, gdzie n jest liczbą całkowitą). Szerokość impulsów wynosiła $100 \mu s$. Można zauważyć, że obwiednia sygnału U_G jest przesunięta o jedną czwartą okresu w odniesieniu do obwiedni sygnału U_C . Czas ustalania się przebiegu na wyjściu U_C wynosi ok. $50 \mu s$. W tym odcinku czasu rejestracja przebiegu zwanego z pojemnością próbki może być obciążona dużym błędem.



Rys. 4. Stany przejściowe w układach detektorów fazoczułych miernika 7200, będących odpowiedzią na impulsowe pobudzenie wejść tych układów. Przebiegi czasowe napięć U_C i U_G zarejestrowano na wyjściach miernika 7200 przy zwieraniu klucza Z na wejściu układu lock-in pokazanego na rysunku 2. Okres powtarzania impulsów wejściowych wynosił ok. 1 ms i był bliski wielokrotności okresu sygnału pomiarowego 1 MHz. Można zauważyć, że obwiednia sygnału U_G jest przesunięta o jedną czwartą okresu w odniesieniu do obwiedni sygnału U_C .

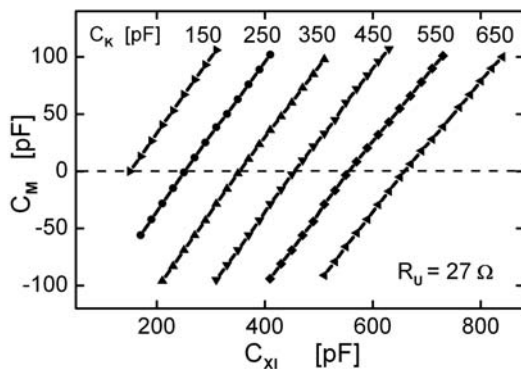
Efekt ten można zminimalizować dwoma sposobami. Pierwszy, to zmniejszenie szybkości zboczy impulsów sterujących tranzystorami MOSFET realizujących funkcję klucza Z. Drugi polega na synchronizacji przebiegu kluczującego z przebiegiem pomiarowym 1 MHz. Można wtedy tak dobrać przesunięcie fazy pomiędzy tymi przebiegami, aby składowa związana z stanami przejściowymi w przebiegu U_C była jak najmniejsza [5]. Natomiast składowa przejściowa w przebiegu U_G będzie wtedy maksymalna.

Procedura korekcji wyników pomiarów relaksacyjnych przebiegów pojemności

Wprowadzenie dodatkowych elementów w tor pomiarowy miernika 7200 (transformator T_{R2} , rezystory R_U i R_O – rys. 2) powoduje zmianę czułości przyrządu i wymaga korekcji wartości wykonanych pomiarów. W tym celu należy wyznaczyć odpowiednie funkcje korekcyjne na podstawie wyników pomiarów pojemności wzorcowych. Wyniki pomiarów kalibracyjnych przedstawiono na rysunku 5. Przedstawiają one zależność wartości pojemności zmierzonej C_M (przedstawionej na wyświetlaczu miernika 7200) od pojemności wzorcowej C_{X1} , pojemność kompensująca C_K jest parametrem. Można zauważyć nieliniowości wyznaczonych charakterystyk i zmianę ich nachylenia w zależności od wartości pojemności kompensującej C_K . Wyznaczając funkcje odwrotne do charakterystyk przedstawionych na rysunku 5 otrzymuje się charakterystyki korekcyjne. Przykładowo, charakterystyka korekcyjna F_{350} wyznaczona dla pojemności kompensującej $C_K = 350$ pF pozwalająca na obliczenie poprawnej wartości pojemności próbki ma postać

$$(3) \quad C_X = F_{350}(C_M) = 7 \cdot 10^{-7} C_M^3 + 3 \cdot 10^{-4} C_M^2 + 1,52 C_M + 354$$

Procedura pomiaru w systemie DLTS polega na wstępnym skompensowaniu pojemności próbki, następnie na impulsowej zmianie napięcia polaryzacji i rejestracji relaksacyjnego przebiegu pojemności zgodnie z równaniem (1). Zarejestrowany przebieg należy skorygować wykorzystując wyznaczone funkcje korekcyjne.



Rys. 5 Charakterystyki korekcyjne głowicy przedstawionej na rysunku 2 przy pomiarach pojemności wzorcowej w zakresie $C_{XI} = 150\text{--}860\text{ pF}$ dla różnych wartości pojemności kompensującej C_K . C_M jest wartością zmierzona.

Procedura korekcyjna wymaga znajomości pojemności kompensującej, przy której wykonano pomiary. Fabryczne kompensatory budowane są zazwyczaj w oparciu o kondensator zmienny powietrzny obracany silnikiem krokowym i nie zawsze są precyzyjnie kalibrowane. Korekcja zarejestrowanego przebiegu dokonana z zastosowaniem funkcji wyznaczonej dla innej wartości pojemności kompensującej powoduje wystąpienie błędu w odtwarzanej wartości pojemności próbki.

Podsumowanie

Badanie centrów defektowych metodą DLTS jest procesem trudnym i wymagającym stosowania zaawansowanej aparatury pomiarowej. Warunki pomiaru relaksacyjnych przebiegów pojemności próbki powodują konieczność szczególnie precyzyjnej konstrukcji stanowiska badawczego. Wiele laboratoriów stosuje sprzęt własnej konstrukcji, co wymaga dużej wiedzy metrologicznej i doświadczenia konstrukcyjnego. Stanowisko takie może być zestawione z produkowanych fabrycznie przyrządów, ale takie rozwiązanie wykazuje szereg ograniczeń [14]. Dotyczą one głównie szerokości impulsów napięcia polaryzującego próbkę. W systemach pomiarowych DLTS stosowany jest często miernik pojemności firmy Boonton model 7200, który umożliwia pomiary przy zastosowaniu impulsów polaryzujących o szerokości minimalnej rzędu kilkudziesięciu mikrosekund. W pracy przedstawiono układ zewnętrznej głowicy do tego miernika, umożliwiającej pomiary z zastosowaniem impulsów o szerokości od 100 ns. Zwrócono uwagę na stany przejściowe w układach RLC występujących w mostkach do pomiaru pojemności przy pobudzaniu impulsowym. Przebiegi mają wtedy charakter oscylacyjny tłumiony. Wskazano sposoby minimalizacji tego zjawiska poprzez włączenie elementów tłumiących i przez odłączanie części układu w momencie występowania impulsu polaryzującego. Pokazano również przebiegi przejściowe w detektorach fazoczułych miernika pojemności oraz zaproponowano metodę korekcji wyników pomiarów.

Praca była wykonana częściowo w ramach projektu badawczego MNT/CONSEPT/2012.

Podziękowanie

Szczególne podziękowanie autorzy kierują do dr. inż. Pawła Zabierowskiego z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej za cenne dyskusje w okresie powstawania pracy.

LITERATURA

- [1] Lang D.V., Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *J. Appl. Phys.* 45 (1974), n.7 3023-3032
- [2] Miller G., Ramirez J., Robinson D., A correlation method for semiconductor transient signal measurements, *J. Appl. Phys.*, 46 (1975), n.6, 2638-2644
- [3] Pawłowski M, Obrazowanie struktury defektowej materiałów półprzewodzących z wykorzystaniem niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej, WAT (2007)
- [4] Ferenczi G., Horvath P., Toth F., Kiss J., Boda J., Method for deep level transient spectroscopy scanning and apparatus for carrying out the method, *United States Patent* 4437060, Mar. 13, 1984
- [5] Deep Level Spectrometer DLS 82E, Operating manual, Research Institute for Technical Physics, Budapest (1986)
- [6] Dobaczewski L., Kaczor P., Hawkins D., Peaker A.R., Laplace transform spectroscopic studies of defects in semiconductor, *J. Appl. Phys.*, 6 (1994), 194-198
- [7] Laplace Transient Processing System, Copernicus Project CIPA CT-94 0172 i The Foundation for Polish Science, ver. 3.3 (2008)
- [8] Model 7200, Capacitance Meter, Instruction Manual, Boonton Electronics Corporation (1996)
- [9] Doolittle W.A., Rohatgi A., A novel computer based pseudologarithmic capacitance/conductance DLTS system specifically designed for transient analysis, *Rev. Sci. Instrum.* 63 (1992), 5733-5741
- [10] Ćwirko R., System do badania charakterystyk C-V struktur półprzewodnikowych w środowisku zmiennie-temperaturowym, Sprawozdanie z pracy badawczej Nr PBW/GD967, WAT (2007)
- [11] Chappell T. I., Ransom C. M.: Modifications to the Boonton 72BD capacitance meter for deeplevel transient spectroscopy applications, *Rev. Sci. Instrum.* 55 (1984), 200- 203
- [12] Gutai L., Auxiliary circuits for pulse bias and equivalent series resistance measurements with a Boonton 72B capacitance meter, *Rev. Sci. Instrum.* 57 (1986), 463-465
- [13] Damm W., DLTS Measurements with Boonton Model 7200 Capacitance Meter, *Application Note*, Boonton, Wireless Telecom Group Inc. (2010)
- [14] Pawłowski Michał, Pawłowski Marek, Suproniuk M., Problemy metrologiczne związane z rejestracją niestacjonarnych przebiegów pojemności w metodzie DLTS, *Materiały elektroniczne konferencji Metrologia Wspomagana Komputerowo MWK 2014*, WAT, Waplewo 27-30 maja 2014 r.

Autorzy:

dr hab. inż. Michał Pawłowski, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: Michal.Pawlowski@wat.edu.pl;
 dr inż. Marek Pawłowski, Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, Zakład Półprzewodników, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: marpawlo@if.pw.edu.pl;
 dr inż. Marek Suproniuk, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, E-mail: Marek.Suproniuk@wat.edu.pl.