

# Nowe stanowisko pomiarowe do charakteryzacji centrów defektowych metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej

Michał Kozubal<sup>1</sup>, Michał Pawłowski<sup>2</sup>, Marek Pawłowski<sup>3</sup>, Michał Brzozowski<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych  
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;  
e-mail: mskozub@itme.edu.pl

<sup>2</sup> Wojskowa Akademia Techniczna,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

<sup>3</sup> Wydział Fizyki, Politechnika Warszawska,  
Koszykowa 75, 00-662, Warszawa

**Streszczenie:** W oparciu o miernik pojemności zestawiono nowy układ do pomiarów metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej (DLTS). Rejestracja relaksacyjnych przebiegów pojemności pozwoliła na zastosowanie zaawansowanych procedur numerycznych, które umożliwiają uzyskanie dwuwymiarowych powierzchni widmowych. Na podstawie tych powierzchni możliwe jest następnie określenie temperaturowych zależności szybkości emisji nośników ładunku związanych z głębokimi poziomami defektowymi. Zależności te umożliwiają określenie podstawowych parametrów elektrycznych wykrytych centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych z większą precyzją i rozdzielczością niż dotychczas za pomocą spektrometru DLS-81. Artykuł opisuje projekt, budowę oraz proces uruchomienia nowego stanowiska pomiarowego do charakteryzacji centrów defektowych metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej wraz z przykładowymi wynikami pomiarów oraz analizy numerycznej opartej na algorytmie korelacyjnym oraz algorytmie odwrotnej transformaty Laplace'a na przykładzie głębokich centrów defektowych wykrytych w warstwie epitaksjalnej 4H-SiC.

**Słowa kluczowe:** DLTS, centra defektowe, SiC

## New measurement system for characterization of defect centers by capacitance transient spectroscopy method

**Abstract:** A new capacitance transient spectroscopy measurement system has been set up based on a capacitance meter. The acquisition of capacitance transients has allowed the application of advanced numerical methods which make obtaining two-dimensional spectral surfaces possible. These surfaces enable the determination of the temperature dependences of the emission rates of charge carriers related to deep defect levels. As a result, the electrical parameters of detected traps are likely to be specified with higher precision and resolution than when using the DLS-81 spectrometer. The present paper describes the design, construction and start up of the new measurement system for the characterization of defect centers by means of the deep level transient spectroscopy method with exemplary test results and a numerical analysis based on the correlation algorithm and the inverse Laplace transform algorithm for deep defect centers detected in the 4H-SiC epitaxial layer.

**Key words:** DLTS, defect centers, SiC

## 1. Wprowadzenie

Kiedy w 1974 roku pracownik Laboratoriów Bell'a, David Vern Lang opublikował swoją przełomową pracę dotyczącą nowego sposobu analizy niestacjonarnych przebiegów pojemności, możliwości charakteryzacji materiałów półprzewodnikowych znacznie się poszerzyły [1]. Wcześniejsza metoda badania właściwości aktywnych elektrycznie defektów punktowych poprzez analizę relaksacyjnych przebiegów pojemności posiadała bardzo małą rozdzielczość i pozwalała na rozdzielenie najwyżej trzech składowych sygnału, które były związane z trzema rodzajami pułapek głębokich [2]. Wiązało się to jednak z bardzo uciążliwymi i długotrwałymi pomiarami powtarzanymi w różnych temperaturach. Nowa metoda Langa, nazwana przez niego *Deep-Level Transient Spec-*

*troscopy* (DLTS) pozwala w elegancki sposób przedstawić widmo pułapek obecnych w badanym materiale dla danego, tzw. *okna szybkości emisji* w funkcji temperatury próbki [1]. Postać widmowa oraz wybór *okna szybkości emisji* pozwalającego z kolei wyznaczyć szybkość emisji nośników ładunku z danej pułapki dawały szybszy i całościowy obraz struktury defektowej w danym materiale, jednocześnie upraszczając procedurę wyznaczania parametrów elektrycznych wykrytych pułapek. Metoda DLTS miała większą zdolność rozdzielczą i umożliwiła określanie parametrów wielu rodzajów pułapek. Ponadto metoda ta, dzięki zastosowaniu wzmacniaczy *lock-in*, wysokim częstotliwościom pomiarowym oraz dużym liczbom uśrednień mierzonego sygnału charakteryzowała się bardzo dużą odpornością na szumy. Nowa metoda Lang'a umożliwiła także określanie zupełnie nowego, jak na tamte czasy parametru – koncentracji wykrytych pułapek.

Wraz z upływem czasu oraz pojawianiem się nowych materiałów i ich nowych zastosowań wzrosło zapotrzebowanie na pomiary o jeszcze wyższej czułości i rozdzielczości spektralnej. Nowe materiały, takie jak SiC czy GaN a także nowe zastosowania metody DLTS w obszarze struktur niskowymiarowych narzuciły wyższe wymagania dotyczące zdolności rozróżnienia innych typów pułapek o bardzo zbliżonych parametrach [3 - 4].

Pod koniec lat 80' pojawiła się idea, aby relaksacyjne przebiegi pojemności analizować za pomocą odwrotnej transformaty Laplace'a. Transformata ta umożliwia określenie parametrów wielu krzywych eksponencjalnych składających się na dany przebieg relaksacyjny. Pionierem na tym polu był Leszek Dobaczewski [5], który zastosował program komputerowy CONTIN bazujący na metodzie regularyzacji Tikhonova napisany przez Stephena Provenchera w języku FORTRAN [6 - 7]. Głównym zastosowaniem tego programu jest numeryczna realizacja odwrotnej transformaty Laplace'a, czyli w kontekście metody DLTS analiza przebiegów relaksacyjnych złożonych z kilku przebiegów eksponencjalnych. Metoda DLTS wspierana zastosowaniem procedury Laplace'a stała się potężną techniką eksperymentalną umożliwiającą wykrywanie i określanie parametrów pułapek głębokich, których poziomy energetyczne leżą blisko siebie.

## 2. Motywacja

W związku z postępem w dziedzinie analizy sygnałów jaki nastąpił na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat niezbędne jest rozwijanie układów pomiarowych, które będą mogły korzystać z rezultatów pracy metrologów. W przypadku badania właściwości centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej bardzo popularnym przyrządem oferowanym komercyjnie był spektrometr DLS-81 z zaimplementowaną jednowymiarową procedurą BOXCAR [8]. W wyniku tej procedury przyrząd pozwala zarejestrować jednowymiarowe widma dla danego okna szybkości emisji nośników ładunku. Widma te interpretuje się jako krzywe Gaussa, które odpowiadają poziomom energetycznym głębokich centrów defektowych wykrytych w danej próbce kryształu półprzewodnikowego. W przypadku istnienia w badanym monokryształe defektów punktowych wprowadzających głębokie poziomy niewiele różniące się od siebie energią aktywacji określenie ich parametrów elektrycznych staje się bardzo trudne, a w wielu przypadkach niemożliwe. Jedyną metodą rozdzielania szerokiej linii widmowej związanej z kilkoma różnymi centrami defektowymi uzyskanej dzięki spektrometrowi DLS-81 jest jej dekonwolucja sumą funkcji Gaussa. Metoda ta jest jednak obciążona pewnym błędem, który rośnie wraz z maleniem różnicy między energiami aktywacji dla różnych poziomów. Jednocześnie utrudnione jest prawidłowe określenie przekroju czynnego na wychwyty nośników ładunku oraz określenie koncentracji

pułapek wprowadzających te poziomy do przerwy energetycznej.

Osiągnięcie znacznie większych możliwości rozdzielczych jest możliwe dzięki zastosowaniu analizy numerycznej relaksacyjnych przebiegów pojemności opartych na odwrotnej transformacie Laplace'a [5 - 6, 9]. Jeśli jednak stosunek sygnału do szumu jest mały procedura ta może dać artefakty i dlatego należy również zastosować komplementarną do niej procedurę korelacyjną [9]. Procedura ta jest analogiczna do procedury BOXCAR stosowanej w przypadku spektrometru DLS-81. W celu zastosowania powyższych procedur układ pomiarowy musi rejestrować niestacjonarne przebiegi pojemności w odpowiednich zakresach czasu ich trwania wraz z odpowiednio dużą częstotliwością próbkowania. Aby to osiągnąć należy zastosować szybki i czuły miernik pojemności.

Artykuł opisuje projekt, budowę oraz możliwości nowego stanowiska pomiarowego do charakteryzacji centrów defektowych metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej. Podano również przykładowe wyniki pomiarów głębokich centrów defektowych wykrytych w warstwie epitaksjalnej 4H-SiC oraz ich analizę numeryczną opartą na algorytmie korelacyjnym oraz algorytmie odwrotnej transformaty Laplace'a.

## 3. Zasada pomiaru i budowa układu pomiarowego

Prostokątny impuls napięciowy polaryzujący mierzoną diodę zaburza równowagę obsadzenia stanów pułapkowych poprzez skokową zmianę szerokości warstwy ładunku przestrzennego w obszarze złącza półprzewodnikowego. Wywołane w ten sposób relaksacyjne przebiegi pojemności zawierają informację o głębokich poziomach pułapkowych obecnych w obszarze złącza. Zgodnie z teorią DLTS'u, przebiegi te mają charakter eksponencjalny (są zwykle sumą kilku funkcji eksponencjalnych), a współczynnik przy wykładniku i współczynnik przedeksponencjalny pozwalają określić parametry elektryczne wykrytych pułapek [1 - 4]. Są to: energia aktywacji termicznej  $E_a$ , przekrój czynny na wychwyty nośników ładunku  $\sigma$  oraz koncentracja pułapek.

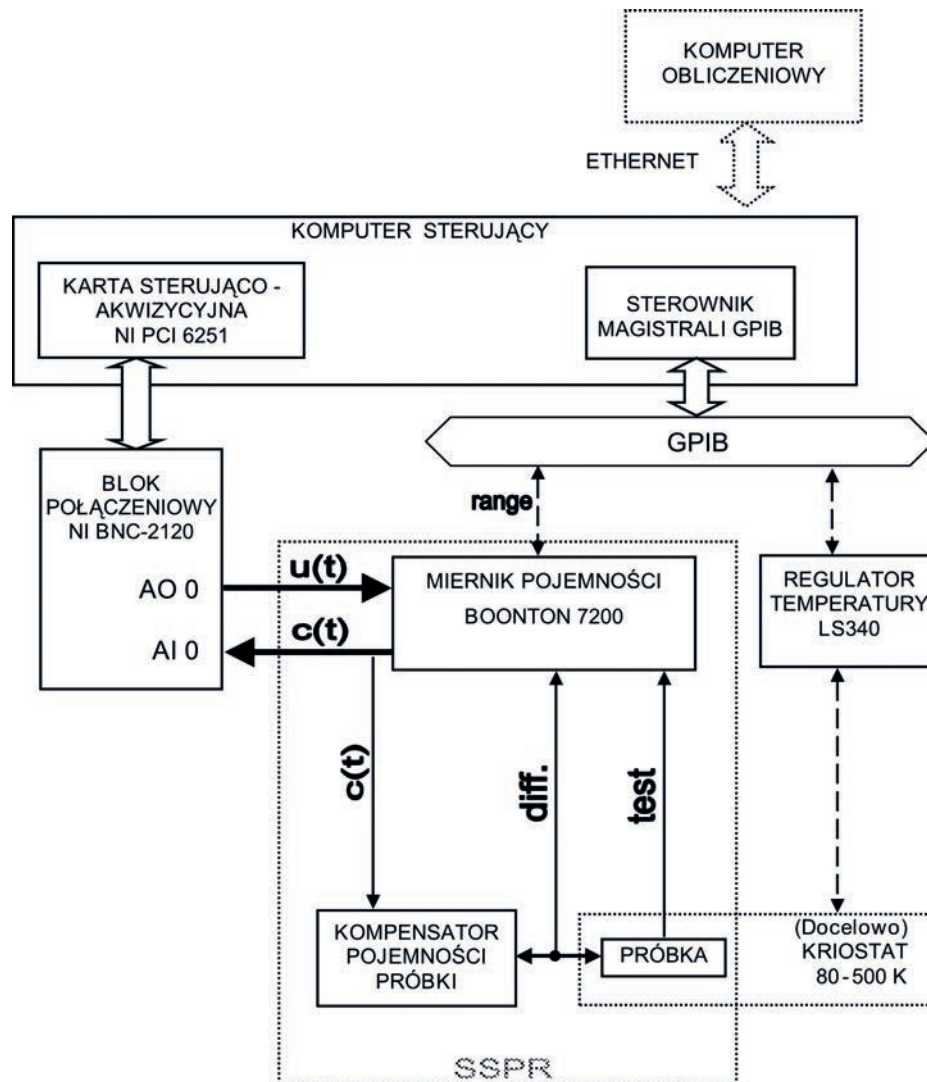
Impuls napięciowy w obecnej konfiguracji generowany jest przez kartę sterująco-akwizycyjną i za pośrednictwem bloku podłączeniowego BNC podawany jest na wejście miernika pojemności BOONTON 7200 [10]. Sterowanie amplitudą tego impulsu oraz czasem jego trwania odbywa się za pośrednictwem komputera sterowanego poprzez magistralę GPIB. Następnie impuls napięciowy trafia do mierzonej próbki, w której wywołuje niestacjonarne przebiegi pojemności. W celu obserwacji jedynie składowej niestacjonarnej wartości pojemności złącza w stanie stacjonarnej polaryzacji jest równoważona tak zwaną pojemnością kompensującą. Do tego celu zastosowano automatyczny kompensator pojemności, którego

budowa i działanie omówione jest w dalszej części artykułu. Niestacjonarne przebiegi pojemności wywołane w spolaryzowanym złączu półprzewodnikowym impulsem napięciowym mierzone są za pomocą cyfrowego miernika BOONTON 7200 i rejestrowane na komputerze sterująco-akwizycyjnym za pomocą karty National Instruments PCI 6251. Aby wyznaczyć wartość energii aktywacji i wartość przekroju czynnego na wychwyty nośników ładunku dla wykrytych pułapek należy określić temperaturową zależność zmiany szybkości emisji nośników, które obsadzają poziomy energetyczne związane z tymi pułapkami. W tym celu pomiar wykonuje się w funkcji temperatury. Mierzone złącze półprzewodnikowe jest umieszczone w głowicy pomiarowej umożliwiającej grzanie próbek do temperatury  $\sim 500$  K. Temperatura kontrolowana jest za pomocą regulatora temperatury Lake Shore LS340, który również jest sterowany z komputera poprzez magistralę GPIB. Regulator LS340 wykorzystuje tak zwany kontroler proporcjonalno-całkująco-różniczkujący PID, czyli mechanizm sprzężenia zwrotnego realizujący algo-

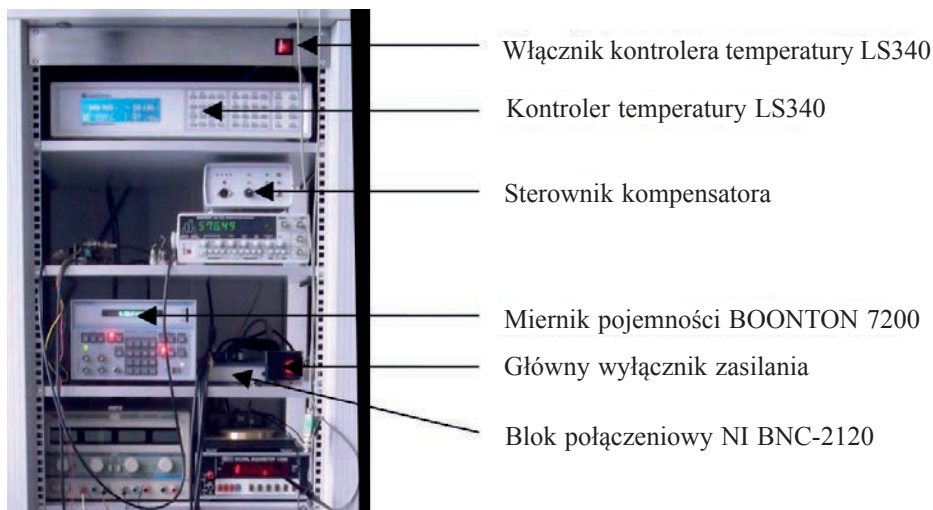
rytm oparty na trzech członach: członie proporcjonalnym P (wzmacniającym sygnał wejściowy), członie całkującym I (proporcjonalnym do całki po czasie z sygnału wejściowego) oraz członie różniczkującym D (proporcjonalnym do pochodnej sygnału po czasie) [11]. Parametry P, I, D są bardzo ważne ponieważ decydują o tym jak szybko osiągnięta zostaje zadana temperatura.

Cały układ pomiarowy zestawiono wewnątrz 19" szafy na aparaturę pomiarową firmy Schroff. Schemat blokowy nowego układu do pomiarów metodą DLTS przedstawiono na Rys. 1.

Liniami przerywanymi zaznaczono tory sygnałów sterujących, a liniami ciągłymi tory sygnałów pomiarowych. Liniami punktowymi zaznaczono połączenia i bloki opcjonalne. W szczególności dotyczy to kriostatu azotowego oraz sprzętowego symulatora przebiegów relaksacyjnych (SSPR). Wyniki pomiarów mogą być następnie przetwarzane na komputerze sterująco - akwizycyjnym, jak również na innych komputerach wyposażonych w oprogramowanie do obliczeń oraz wizualizacji wyników.



**Rys. 1.** Schemat blokowy układu pomiarowego DLTS.  
**Fig. 1.** Block diagram of the DLTS measurement system.



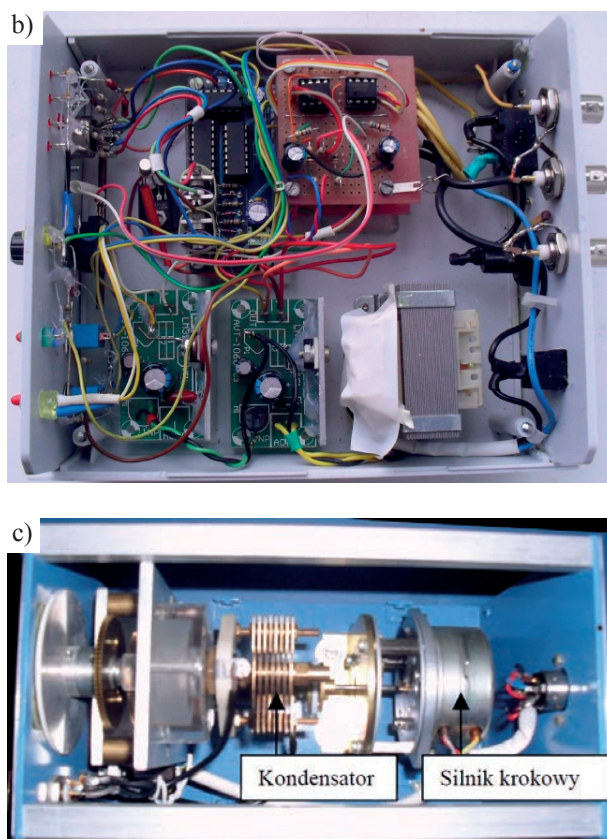
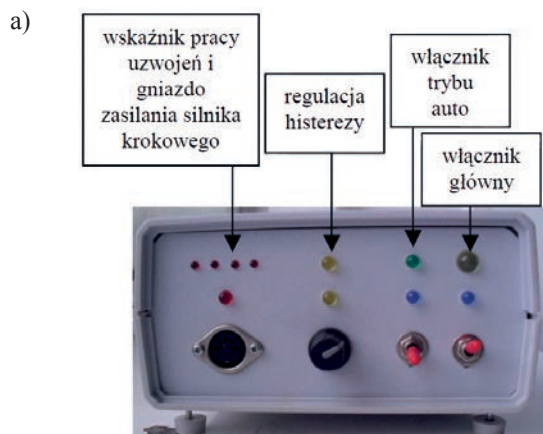
**Rys. 2.** Zdjęcie nowego układu do pomiarów metodą DLTS.  
**Fig. 2.** Picture of the new DLTS measurement system.

Podczas zestawiania aparatury wykonano specjalizowane elementy a także wydzielono osobny obwód zasilający dla wszystkich elementów składających się na nowy układ pomiarowy. Ponadto komputer sterująco-akwizycyjny wyposażono w zasilacz bezprzerwowi (UPS). Poniżej przedstawiono zdjęcie nowego układu do pomiarów metodą DLTS (Rys. 2).

#### 4. Budowa kompensatora pojemności próbki

W przypadku zaistnienia potrzeby badania parametrów elektrycznych pułapek głębokich w obszarze złącz półprzewodnikowych o dużej pojemności elektrycznej konieczna jest kompensacja tej pojemności. W celu kompensacji pojemności składowej stałej złącza półprzewodnikowego podczas pomiaru metodą DLTS zbudowano kompensator pojemności próbki. Urządzenie to składa się z kondensatora powietrznego, silnika krokowego wraz z układem zasilania i sterowania oraz z komparatora.

Kompensator działa w trybie autonomicznym (tryb auto). Wygląd całego kompensatora przedstawiono na Rys. 3.

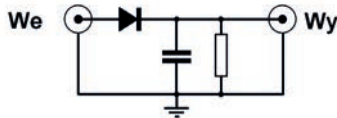


**Rys. 3.** Widok kompensatora pojemności dla nowego układu do pomiarów metodą DLTS: a) sterownik kondensatora, panel przedni; b) sterownik kondensatora - wnętrze; c) silnik krokowy wraz z kondensatorem

**Fig. 3.** View of the capacity compensator for the new DLTS measurement system: a) the front panel of the capacitor controller; b) the interior of the capacitor controller; c) the stepper motor with the capacitor.

## 5. Oprogramowanie sterujące nowym układem do pomiarów metodą DLTS

Kluczowym problemem do rozwiązania podczas tworzenia oprogramowania sterującego - akwizycyjnego w środowisku LabView było uzyskanie poprawnej synchronizacji procesu generacji impulsu zapełniającego warstwę ładunku przestrzennego i procesu rejestracji danych. W tym celu miernik pojemności i próbkę zastąpiono sprzętowym symulatorem przebiegów relaksacyjnych (SSPR), którego schemat przedstawiono na Rys. 4.



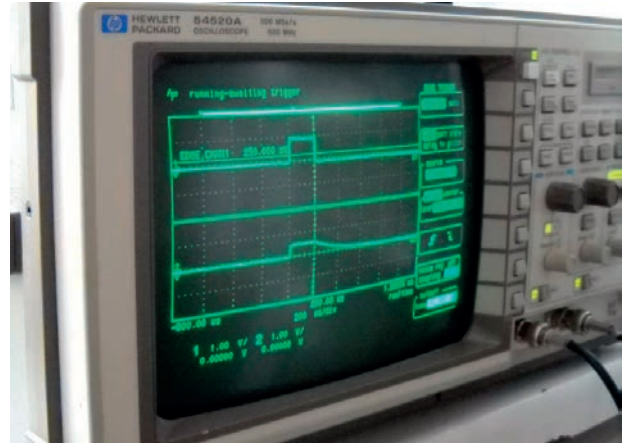
**Rys. 4.** Schemat ideowy symulatora relaksacyjnych przebiegów pojemności.

**Fig. 4.** Schematic diagram of the capacitance transient simulator.

Kondensator ładowany jest przez diodę i po wyłączeniu impulsu rozładowuje się przez rezystor zastosowany w układzie oraz równoległe do niego włączoną rezystancję wejściową wejścia analogowego AI 0 karty. Symulator zamienia przychodzący z układu impuls prostokątny na przebieg relaksacyjny o stałej czasowej wynikającej z zastosowanych elementów. Impulsy na wejściu i wyjściu symulatora obserwowano na oscyloskopie. Przebiegi przedstawiono na zdjęciu oscyloskopu (Rys. 5), gdzie można zauważyć proces szybkiego ładowania kondensatora poprzez kartę pomiarowo akwizycyjną i powolne rozładowanie ze stałą czasową większą o ponad rząd wielkości.

Symulator sprzętowy umożliwił tworzenie i testowanie oprogramowania sterującego-akwizycyjnego niezależnie od miernika pojemności BOONTON 7200. Pozwalało to programiście na pracę zdalną na stanowisku wyposażonym jedynie w kartę pomiarowo-akwizycyjną i symulator miniaturowych rozmiarów.

Jednocześnie, również w środowisku LabView, opracowano program sterujący regulatorem temperatury Lake Shore 340, który jest programem samodzielnym i niezależnym od pomiaru przebiegów pojemności. Program ten, w trybie sprzężenia zwrotnego ustawia temperaturę grzałki wykorzystując jeden z dwóch czujników temperatury podłączonych do sterownika LS 340. Drugi czujnik mierzy temperaturę w bezpośrednim kontakcie z próbką, a jego wskazania

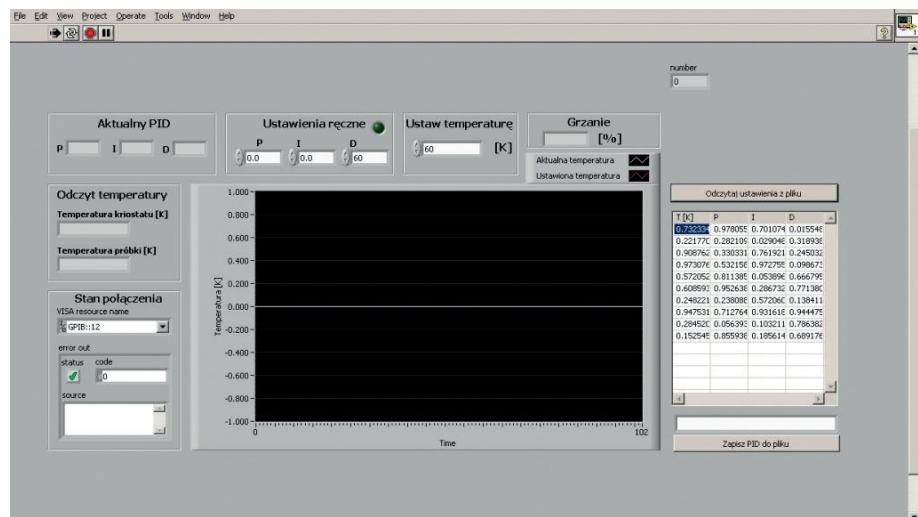


**Rys. 5.** Widok impulsu napięciowego na wejściu symulatora (górny) i przebiegu pojemności na jego wyjściu (dolny) na oscyloskopie. Widoczna jest relaksacja pojemności po wyłączeniu impulsu wejściowego.

**Fig. 5.** View of the voltage pulse at the input of the simulator (top) and the capacitance waveform on its output (bottom) on the oscilloscope. The capacitance relaxation after turning the input pulse off can be seen.

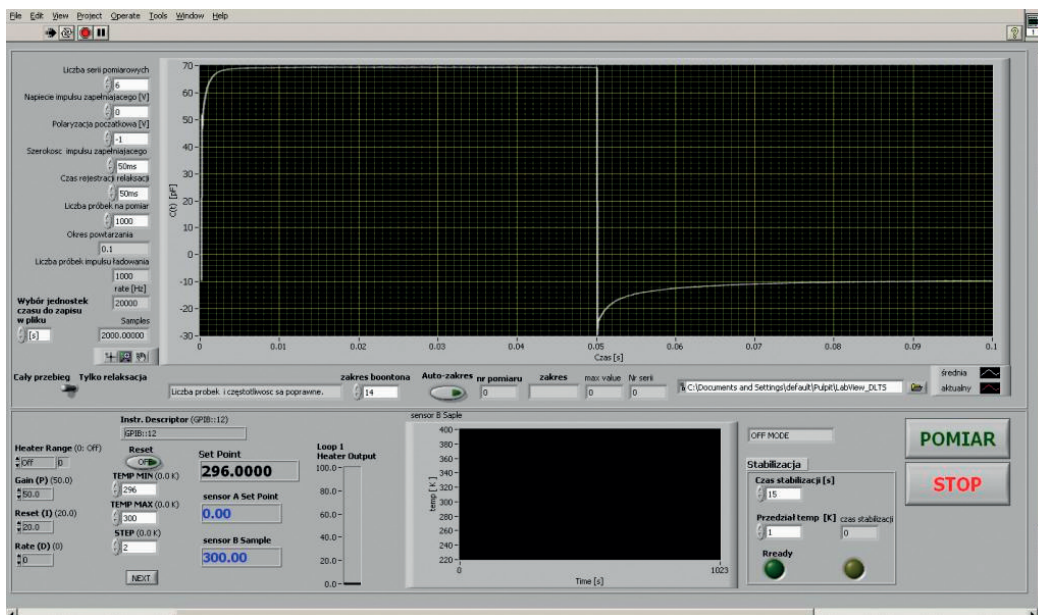
są rejestrowane. Program ten posiada tryb automatycznego doboru optymalnych wartości parametrów P, I, D, które określają charakter dochodzenia do zadanej temperatury. Parametry P, I, D wyznaczone w trybie automatycznym są zapisywane do pliku zewnętrznego i mogą być następnie użyte dla tej samej konfiguracji pomiarowej (tej samej głowicy, kriostatu, uchwytu na próbki) dla zapewnienia powtarzalności warunków pomiaru. Wygląd głównego okna samodzielnego programu sterującego kontrolerem temperatury przedstawiono na Rys. 6.

Końcowa wersja programu obsługującego nowy układ do pomiarów metodą DLTS integruje funkcjonalności powyższych programów. Tryb automatycznego doboru optymalnych wartości parametrów P, I, D nie został



**Rys. 6.** Widok głównego okna programu do sterowania kontrolerem temperatury LS340 z trybem automatycznego doboru wartości parametrów PID.

**Fig. 6.** View of the main window of the software for the LS340 temperature controller with the mode enabling automatic selection of the PID parameters.



**Rys. 7.** Wygląd głównego okna programu sterująco-akwizycyjnego do pomiarów metodą DLTS na ekranie komputera sterująco-akwizycyjnego.

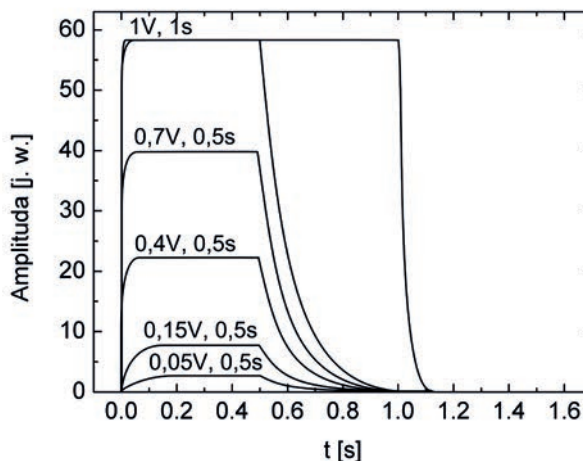
**Fig. 7.** View of the main window of the control - acquisition software used in the case of the DLTS method. on the screen of the control - acquisition computer.

włączony do programu głównego ponieważ parametry te charakteryzują daną głowicę pomiarową, kriostat lub komorę wysokotemperaturową i nie są zmieniane podczas pomiarów metodą DLTS.

Na Rys. 7 przedstawiono wygląd głównego okna programu sterującego nowym układem. Program ten umożliwia między innymi ustawienie parametrów pomiaru, rozdzielczości rejestracji danych, szybkości oraz zakresu zmiany temperatury podczas całego pomiaru metodą DLTS.

Główne okno można podzielić na dwie części. W części górnej znajdują się pola z których program pobiera wartości parametrów kształtujących impuls wypełniający czas jego trwania oraz liczbę serii pomiarowych. W części tej znajduje się również duże pole z układem współrzędnych w którym podczas pomiaru, można obserwować niestacjonarny przebieg pojemności, który jest jednocześnie rejestrowany na dysku komputera. Wykres umożliwia jednocześnie wyświetlanie aktualnego przebiegu oraz przebiegu uśrednionego (linia biała). W części dolnej znajdują się pola z których pobierane są wartości parametrów potrzebnych do kontroli temperatury. Są to między innymi parametry P, I, D oraz wartości początkowej i końcowej temperatury pomiaru wraz z wartością kroku temperatury. W części tej można również obserwować proces wyrównywania się temperatury próbki i zadanej temperatury pomiaru. Można również ustawić dla jakiej maksymalnej różnicy między temperaturą zadaną i zmierzoną na próbce ma rozpocząć się pomiar niestacjonarnych przebiegów pojemności. Po wpisaniu wszystkich parametrów wymaganych do wykonania pomiaru i uruchomieniu programu, pomiar wykonywany jest automatycznie aż do osiągnięcia temperatury końcowej.

Na Rys. 8 przedstawiono wyniki próbnych pomiarów testowej diody krzemowej dla różnych amplitud impulsu wypełniającego oraz jeden przebieg uzyskany dla impulsu o dwukrotnie dłuższym czasie trwania dla diody o innej stałej czasowej zaniku pojemności. Dzięki zmianie amplitudy impulsu napięciowego możliwe jest określenie rozkładu zmian koncentracji pułapek głębokich w funkcji



**Rys. 8.** Przykładowe wyniki próbnych pomiarów niestacjonarnych przebiegów pojemności testowej diody krzemowej dla różnych amplitud impulsu wypełniającego oraz dla diody o innej stałej czasowej przy dłuższym czasie trwania impulsu wypełniającego ilustrujące możliwości zmiany parametrów impulsu napięciowego.

**Fig. 8.** Exemplary results of the test measurements of the capacitance transients of a silicon diode for different filling pulse amplitudes and for a diode having a different time constant with a longer duration filling pulse, illustrating the possibility of changing the voltage pulse parameters.

głębokości wnikania w warstwę ładunku przestrzennego w obszarze złącza półprzewodnikowego. Z drugiej strony pomiary w funkcji czasu trwania impulsu napięciowego pozwalają uzyskać informacje wskazujące na przykład na obecność linii dyslokacyjnych w pobliżu wykrytych pułapek [12] lub na to, że pewne pułapki charakteryzują się ujemną energią korelacyjną (*negative - U*) [13],

## 6. Przykładowy pomiar metodą DLTS

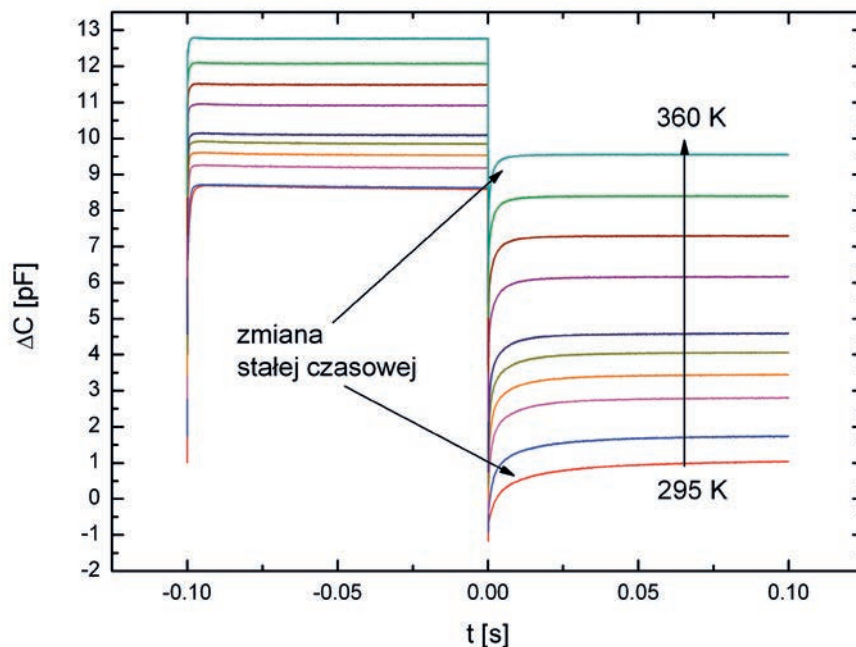
Próbne pomiary testowych diod Schottky'ego przeprowadzono w zakresie temperatur pokojowych na próbkach warstw epitaksjalnych SiC. Do pomiaru wybrano warstwy epitaksjalne 4H-SiC o koncentracji elektronów  $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Pomiar wykonano w zakresie temperatur od 297 K do 360 K, impuls zapełniający miał amplitudę 10 V przy polaryzacji w kierunku zaporowym wynoszącej również 10 V. Ze względu na szybkie nasycanie się wartości pojemności przyjęto szerokość impulsu zapełniającego wynoszącą 1 ms. Liczba próbek dla zaniku pojemności wynosiła 1000 co daje dobrą zdolność rozdzielczą. Podczas pomiarów odnotowano pewien poziom zakłóceń, w celu ich częściowej kompensacji pomiar dla każdej temperatury uśredniano 10-krotnie. Niestacjonarne przebiegi pojemności zmierzone i zarejestrowane dla temperatur w zakresie od 292 K do 360 K za pomocą nowego układu do pomiarów metodą DLTS sterowanym programem pracującym w środowisku LabView zilustrowano na Rys. 9. Rysunek wykonano w programie Origin 8.

Na Rys. 9 widoczna jest wyraźna zmiana stałej czasowej relaksacyjnych przebiegów pojemności w funkcji temperatury dla diody Schottky'ego wykonanej na warstwie epitaksjalnej 4H-SiC. Zmiana stałej czasowej jest związana z termiczną emisją elektronów do pasma przewodnictwa, które są w tym przypadku nośnikami większościowymi.

## 7. Analiza wyników

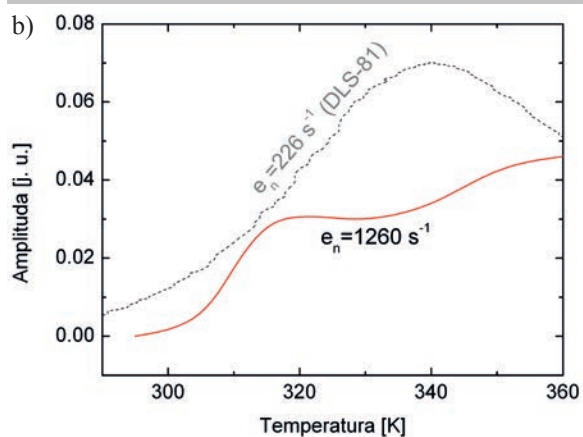
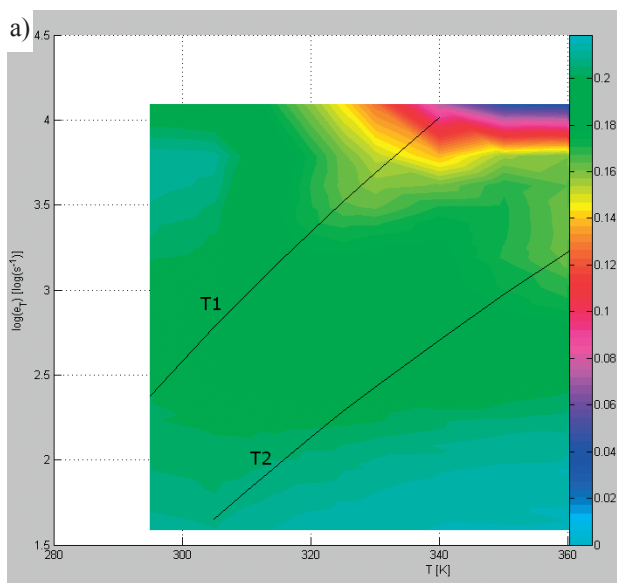
Uzyskane dane pomiarowe zostały następnie przeanalizowane programem Zanvis napisanym w środowisku Matlab, który od kilkunastu lat jest rozwijany w ITME na potrzeby analizy danych uzyskanych za pomocą innej metody badawczej stosowanej w ITME. Metodą tą jest Niestacjonarna Spektroskopia Pojemnościowa o Wysokiej Rozdzielczości (HRPITS) [9]. Program Zanvis jest programem pracującym w środowisku MatLab i może być używany na dowolnym komputerze klasy PC. W opisywanym przypadku był to komputer sterujący - akwizycyjny.

W ramach niniejszej pracy wykonano dwa rodzaje analizy niestacjonarnych przebiegów pojemności metodami numerycznymi. Pierwszą zastosowaną metodą analizy danych była procedura korelacyjna, której działanie jest analogiczne do stosowanej w spektrometrze DLS-81 opartym na woltomierzu typu *lock-in* [8] z tą różnicą, że w tym przypadku możliwe jest przedstawienie nie tylko pojedynczych widm DLTS dla różnych okien szybkości emisji, ale też dwuwymiarowych powierzchni widmowych we współrzędnych szybkość



**Rys. 9.** Temperaturowa zmiana stałej czasowej niestacjonarnych przebiegów pojemności związanych z pułapkami nośników większościowych, zarejestrowanych dla przykładowej warstwy epitaksjalnej 4H-SiC.

**Fig. 9.** Temperature change of the capacitance transient time constant related to majority carrier traps, recorded for an exemplary 4H-SiC epitaxial layer.



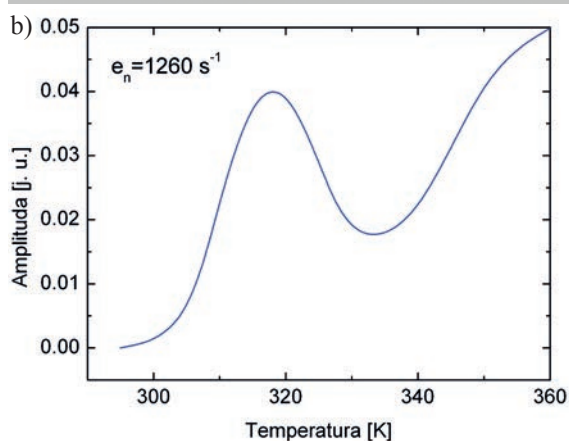
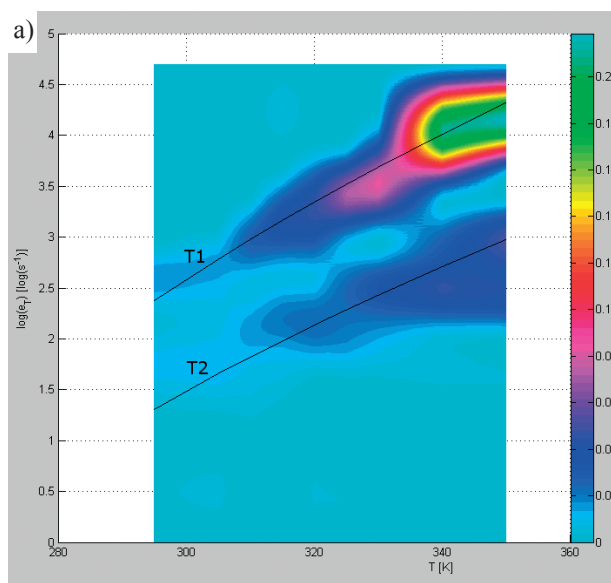
**Rys. 10.** a) Korelacyjna powierzchnia widmowa dla warstwy epitaksjalnej 4H-SiC otrzymana metodą DLTS. Linia ciągłą zaznaczono krzywe Arrheniusa wyznaczone na podstawie analizy widma Laplace'a. b) Przekrój powierzchni widmowej dla szybkości emisji nośników ładunku  $e_n$  równej  $1260 \text{ s}^{-1}$ , linią przerywaną zaznaczono widmo DLTS uzyskane za pomocą spektrometru DLS-81 dla szybkości emisji nośników ładunku równej  $226 \text{ s}^{-1}$ .

emisji – temperatura co poprawia czytelność obrazowania struktury defektowej oraz poprawia dokładność wyznaczenia krzywych Arrheniusa danych równaniem

$$\ln(T^2/e_n) = (E_a/kT) + \ln(1/\sigma_n \gamma_n), \quad (1)$$

w którym  $T$  oznacza temperaturę,  $e_n$  – szybkość emisji elektronów,  $E_a$  – energię aktywacji termicznej,  $k$  – stałą Boltzmana,  $\sigma_n$  – przekrój czynny na wychwytywanie elektronów a  $\gamma_n$  – stałą materiałową.

Wynik przeprowadzenia analizy metodą korelacyjną danych pomiarowych uzyskanych dla warstwy epitaksjal-



**Rys. 11.** a) Prążki widmowe Laplace'a dla warstwy epitaksjalnej 4H-SiC otrzymane metodą niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej. Linia ciągłą zaznaczono krzywe Arrheniusa wyznaczone na podstawie analizy widma Laplace'a. b) Przekrój powierzchni widmowej dla szybkości emisji nośników ładunku  $e_n$  równej  $1260 \text{ s}^{-1}$ .

**Fig. 11.** a) Laplace spectral fringes for the 4H-SiC epitaxial layer obtained by capacitance transient spectroscopy. The solid line indicates the Arrhenius plots estimated from the Laplace spectrum analysis. b) Cross-section of the spectral surface for the carrier emission rate  $e_n$  equal to  $1260 \text{ s}^{-1}$ .

nej 4H-SiC przedstawiono na Rys. 10a. Rys. 10b przedstawia natomiast przekrój tej powierzchni widmowej dla szybkości emisji  $e_n$  równej  $1260 \text{ s}^{-1}$ .

Na Rys. 10a widoczny jest szeroki prążek widmowy związany ze zmianą stałej czasowej niestacjonarnego przebiegu pojemności. Można zauważyć, że szybkość emisji zwiększa się wraz ze zmianą temperatury, jednak ze względu na dużą szerokość połówkową prążka widmowego trudno wyznaczyć krzywą Arrheniusa związaną z tą zmianą szybkości emisji. Biorąc pod uwagę Rys. 10b widoczne jest, że powyższe widmo składa się z sygnałów pochodzących z przynajmniej dwóch poziomów pułapkowych, których nie można było rozróżnić za pomocą miernika DLS-81.



Drugą metodą analizy niestacjonarnych przebiegów pojemności była metoda oparta na procedurze *Odwrotnej Transformaty Laplace'a* [9, 5 - 6]. Procedura ta jest bardzo czuła ale jednocześnie jest wrażliwa na szum pojawiający się w danych pomiarowych. Poniżej przedstawiono powierzchnię widmową Laplace'a powstałą w wyniku przeprowadzenia procedury *Odwrotnej Transformaty Laplace'a* dla tych samych danych co w przypadku metody korelacyjnej wraz z przekrojem dla tej samej szybkości emisji  $e_n = 1260 \text{ s}^{-1}$ .

Jak widać na Rys. 11a - b procedura ta pozwoliła lepiej rozdzielić dwie składowe relaksacyjnych przebiegów pojemności w tym zakresie temperatur. Linie ciągle obecne na rysunku 10a i 11 a ilustrują krzywe Arrhenius'a, będące sygnaturami pułapek głębokich wykrytych w mierzonym materiale. Wykryte pułapki T1 i T2 charakteryzowały się energią aktywacji  $E_a$  wynoszącą odpowiednio 0,563 eV i 0,669 eV oraz parametrem przedeksponencjalnym  $A$  wynoszącym odpowiednio  $1,00 \times 10^6 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$  i  $7,51 \times 10^8 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pułapki te są związane prawdopodobnie z typowymi dla 4H-SiC poziomami  $Z_{1/2}$  obserwowanymi w warstwach epitaksjalnych.

Nowe stanowisko pomiarowe do charakteryzacji centrów defektowych metodą DLTS umożliwia pomiary struktur posiadających pojemność elektryczną, w szczególności pomiary materiałów półprzewodnikowych zawierających złącze prostujące. Miernik pojemności pozwala na pomiar pojemności złącz w zakresie od 0,001 pF do 2000 pF oraz ich konduktancji w zakresie od 0,01  $\mu\text{s}$  do 2000  $\mu\text{s}$ . Czas trwania impulsu zapełniającego można wybierać z zakresu od 1  $\mu\text{s}$  do 1 s, a maksymalna częstotliwość z jaką sygnał może być próbkowany to 1 MHz. Pozwala to na rejestrację przebiegów relaksacyjnych o czasie trwania do kilku sekund. Polaryzację złącza w kierunku zaporowym można zmieniać w zakresie od 0 do 10 V z możliwością rozszerzenia do 60 V. Rejestrowane przebiegi mogą być uśredniane dowolną ilość razy, w praktyce liczba uśrednień nie przekracza 1000 razy i zależy od wybranego czasu trwania rejestracji pojedynczego impulsu. Zakres temperatur pomiaru zależy od zastosowanego kriostatu lub komory wysokotemperaturowej. Dedykowany technice DLTS kriostat umożliwia pomiary w zakresie od 78 K do  $\sim 500 \text{ K}$  co pozwala na pomiar także materiałów o szerokiej przerwie zabronionej takich jak SiC i GaN. Zastosowane procedury pozwalają na analizę całych powierzchni widmowych, a nie widm pojedynczych. Przekłada się to na lepsze zrozumienie procesów zachodzących w obecności struktury defektowej i umożliwia zaobserwowanie zależności nie obserwowanych dotąd podczas analizy kilku jednowymiarowych widm DLTS uzyskanych dla kilku okien szybkości emisji. Kilkakrotnie większa czułość procedury korelacyjnej pozwala także na obserwację sygnałów dotąd nie obserwowanych. Możliwe jest rozdzielenie szerokich prążków widmowych i rozdzielenie pułapek różniących się energią aktywacji zaledwie 0,005 eV.

## 8. Podsumowanie

W ramach niniejszej pracy zrealizowano następujące zadania:

- zestawiono aparaturę wchodzącą w skład nowego układu pomiarowego wraz z wszelkimi niezbędnymi do przeprowadzania pomiarów metodą DLTS komponentami.
- zbudowano i wdrożono cyfrowy układ automatycznej kompensacji.
- opracowano dedykowane oprogramowanie sterujące – akwizycyjne dla nowego układu pomiarowego.
- przeprowadzono próbne pomiary warstw epitaksjalnych 4H-SiC i zarejestrowano dane pomiarowe w funkcji temperatury w sposób zautomatyzowany.
- zastosowano procedury numeryczne do obróbki i analizy danych pomiarowych. W szczególności zastosowano procedurę korelacyjną oraz procedurę opartą na Odwrotnej Transformacie Laplace'a.

Jak wskazują uzyskane wyniki, nowe stanowisko pomiarowe do charakteryzacji centrów defektowych metodą DLTS jest efektywnym narzędziem badania centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych. W chwili oddawania niniejszej pracy do recenzji nowe stanowisko jest gotowe go pomiarów w nowo zainstalowanym kriostacie azotowym, umożliwiającym pomiary w szerokim zakresie temperatur – od 78 K do  $\sim 500 \text{ K}$ . W perspektywie planowane jest również rozbudowanie układu o przystawkę do oświetlania próbki wewnątrz kriostatu, a także zainstalowanie układu zewnętrznego wyzwalań impulsu zapełniającego umożliwiającego polaryzację próbki do napięć rzędu kilkudziesięciu woltów.

## Literatura:

- [1] Lang D. V.: Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *J. Appl. Phys.*, 1974, 45, 3023
- [2] Sah C. T., Forbes L., Rosier L. L., Tasch Jr. A. F.: Thermal and optical emission and capture rates and cross sections of electrons and holes at imperfection centers in semiconductors from photo and dark junction current and capacitance experiments, *Solid State Electron.*, 1970, 13, 759
- [3] Kozubal M.: Wpływ zawartości płytkich domieszek na właściwości i koncentrację głębokich centrów defektowych w monokryształach SiC, rozprawa doktorska, Warszawa, 2011
- [4] Kruszewski P.: Bariery energetyczne w procesach zmiany stanu ładunkowego półprzewodnikowych na-

- nokropek kwantowych systemu InAs/GaAs, rozprawa doktorska, Warszawa, 2010
- [5] Dobaczewski L. et al.: Laplace transform deep-level transient spectroscopic studies of defects in semiconductors, *J. Appl. Phys.*, 1994, 76, 194
- [6] Provencher S. W.: Contin: A general purpose constrained regularization program for inverting noisy linear algebraic and integral equations, *Comp. Phys. Communications*, 1982, 27, 213
- [7] Weese J.: A reliable and fast method for the solution of Fredholm integral equations of the first kind based on Tikhonov regularization, *Comp. Phys. Communications*, 1992, 69, 99
- [8] Research Institute for Technical Physics of the HAS, Deep Level Spectrometer Manual, MTA MFKI, 1981
- [9] Pawłowski M.: Obrazowanie struktury defektowej materiałów półizolujących z wykorzystaniem niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej, Wydawnictwo WAT, 2007
- [10] Boonton Electronics Corporation, Model 7200 Capacitance Meter Instruction Manual, New Jersey, 1996
- [11] Åström K. J., Hägglund T.: PID Controllers. Theory, Design and Tuning, Instrument Society of America, 1995
- [12] Kamiński P., Kozłowski R., Kozubal M., Miczuga M., Palczewska M., Pawłowski M. G., Pawłowski M.: Investigation of defect levels in 6H-SiC single crystals, *Phys. Stat. Sol. C*, 2007, 4, 2967
- [13] Dobaczewski L., Kaczor P.: Ionization and capture kinetics of DX centres in AlGaAs and GaSb: approach for a negative-U defect, *Semicond. Sci. Technol.*, 1991, 6, B51 - B57