

ZASTOSOWANIE PROCEDURY KORELACYJNEJ Z WIELOIMPULSOWYMI FUNKCJAMI WAGOWYMI DO DWUWYMIAROWEJ ANALIZY WIDMOWEJ W NIESTACJONARNEJ SPEKTROSKOPII FOTOPRĄDOWEJ *PITS*

Michał Pawłowski¹, Marcin Miczuga¹

W pracy zaproponowano zastosowanie procedury korelacyjnej z wieloimpulsowymi funkcjami wagowymi do dwuwymiarowej analizy widmowej w metodzie *PITS*. Wieloimpulsowe funkcje wagowe, konstruowane na podstawie algorytmu Gavera-Stehfesta, pozwalają na uzyskanie znacznie lepszej rozdzielczości metody *PITS* w porównaniu z powszechnie stosowaną dwuimpulsową funkcją wagową typu *boxcar*. Dla termicznej emisji elektronów z pułapek EB7, występujących w półizolujących kryształach GaAs, obliczono powierzchnie widmowe *PITS* dla trzech rodzajów funkcji wagowych: funkcji dwuimpulsowej (typu *boxcar*), funkcji czteroimpulsowej (GS4) i funkcji sześćoimpulsowej (GS6). Obliczone powierzchnie widmowe porównano z powierzchniami otrzymanymi dla tych pułapek eksperymentalnie na podstawie zarejestrowanych zaników fotoprądu.

1. WSTĘP

Właściwości materiałów półprzewodnikowych silnie zależą od rodzaju i koncentracji istniejących w tych materiałach głębokich centrów defektowych. Dlatego poznanie struktury defektowej tych materiałów ma duże znaczenie dla oceny ich jakości i przydatności do wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych. Problem ten jest szczególnie istotny w procesie wytwórczym superszybkich scalonych układów cyfrowych oraz monolitycznych układów mikrofalowych i optoelektronicznych, stosowanych zwłaszcza w zaawansowanej technice wojskowej. Materiałami podłożowymi do tych układów są bowiem półprzewodniki wysokorezystywne, takie jak GaAs i InP, w których zanieczyszczenia i defekty punktowe tworzące płytkie poziomy donorowe lub akceptorowe kompensowane są przez głębokie centra defektowe.

¹⁾ Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, ul. Kaliskiego 2 skr. pocztowa 50, 00-908 Warszawa 49, e-mail: mpawlowski@wel.wat.waw.pl

Wyznaczanie parametrów i koncentracji centrów defektowych w materiałach półprzewodnikowych jest procesem złożonym i trudnym technicznie. Pomiaru dokonywane są metodami pośrednimi z wykorzystaniem precyzyjnych urządzeń pomiarowych oraz zaawansowanych metod numerycznych do analizy danych pomiarowych. Obecnie do charakteryzacji materiałów półprzewodnikowych stosowane są głównie metody polegające na pomiarze niestacjonarnych przebiegów pojemności i prądów. Do pomiarów materiałów niskorezystywnych stosowana jest *niestacjonarna spektroskopia pojemnościowa DLTS* [1], natomiast do podłożowych materiałów półizolujących (np. SI GaAs) stosowana jest *niestacjonarna spektroskopia fotoprądowa PITS* [2]. Obydwie metody wykorzystują zjawisko wychwytu i termicznej emisji nośników z głębokich centrów defektowych z tym, że procesapełniania poziomów defektowych odbywa się poprzez impuls elektryczny lub optyczny w metodzie *DLTS* i impuls optyczny w metodzie *PITS*. Sygnałem mierzonym jest w metodzie *DLTS* relaksacja pojemności złącza Schottky'ego lub złącza p-n oraz relaksacja fotoprądu w metodzie *PITS*. Obecnie w pierwszym etapie pomiaru relaksacje są rejestrowane cyfrowo począwszy od zakończenia impulsu zapewniającego. Należy podkreślić, że wpływ poszczególnych centrów defektowych na parametry relaksacji obserwowany jest tylko w wąskich przedziałach temperatur w zależności od energii aktywacji danego poziomu. Dlatego rejestracje przebiegów wykonuje się w szerokim zakresie temperatur, typowo od 20 K do 450 K. Drugi etap pomiaru polega na wydzieleniu z zarejestrowanych cyfrowo danych parametrów centrów defektowych. Przyjmuje się model matematyczny relaksacji w postaci sumy przebiegów eksponencjalnych, których amplitudy są proporcjonalne do koncentracji nadmiarowych elektronów (lub dziur), uwalnianych z głębokich centrów defektowych do pasma przewodnictwa (lub do pasma walencyjnego), a stałe czasowe są odwrotnościami szybkości emisji e_n nośników z tych poziomów. Parametry centrum defektowego wyznacza się z zależności szybkości emisji w funkcji temperatury przedstawianej w postaci wykresu Arrheniusa. Wykres ten we współrzędnych półlogarytmicznych przyjmuje postać prostej, która jest charakterystyczna dla danego centrum defektowego. Z nachylenie prostej wyznacza się energię aktywacji E_a , a z punktu przecięcia z osią rzędnych oblicza się parametr A , zależny od wartości przekroju czynnego na wychwyt elektronów σ i właściwości badanego materiału.

Do analizy danych *PITS* najczęściej stosowana jest procedura korelacyjna [3-5]. Jest ona dość prosta obliczeniowo, a jej właściwości: rozdzielczość i odporność na szum składają się z szumową, zależą od zastosowanej funkcji wagowej. W wyniku obliczeń otrzymywane są jednowymiarowe widma *PITS* w funkcji temperatury dla przyjętego zbioru K wartości okien szybkości emisji $e_{nk} = \text{const}$. Okno szybkości emisji zadawane jest poprzez dobór parametrów funkcji wagowej. Położenie maksimum w widmie określa temperaturę T_M odpowiadającą zadanej wartości szybkości emisji nośników ładunku z wykrytego centrum defektowego. Algorytm analizy jednowymiarowej polega na określeniu temperaturowych położenia wszystkich zaobserwowanych maksimum, występujących w każdym z obliczonych widm, a następnie wyznaczenie temperaturowych zależności szybkości emisji dla wykrytych centrów defektowych.

Wyniki otrzymywane za pomocą procedury korelacyjnej zależą od zastosowanej funkcji wagowej. Stosowane są różne postaci funkcji wagowych: funkcja eksponencjalna, funkcja sinusoidalna, impuls piłokształtny lub funkcje złożone z ciągu impulsów prostokątnych. Próbę określenia rozdzielczości, którą daje zastosowanie procedury korelacyjnej z zastosowaniem różnych funkcji wagowych w metodzie *DLTS*, przedstawił Istratow w [6]. Powszechnie stosuje się dwuimpulsową funkcję wagową, odpowiadającą technice próbkowania stosowanej w analogowym integratorze dwubramkowym (*boxcar*). Umożliwia ona identyfikację dwu składowych eksponencjalnych o relacji szybkości emisji $e_{n1}/e_{n2} > 16,5$. Najlepszą rozdzielczość przy analizie danych *DLTS* uzyskano poprzez zastosowanie funkcji wagowych opartych na algorytmie Gavera-Stehfesta (*GS*) [7-9] do numerycznego obliczania odwrotnego przekształcenia Laplace'a. Algorytm ten liczy odwrotną transformatę Laplace'a jako liniową kombinację wartości przebiegu próbkowanego w równoodległych punktach czasowych. Funkcje wagowe oparte na algorytmie *GS* mają postać szeregu impulsów o różnych amplitudach i położonych w równych odstępach czasu od siebie. Założonej wartości okna szybkości emisji odpowiada inny odstęp czasu pomiędzy próbkami. Wykazano [10], że funkcje te zapewniają rozdzielczość procedury korelacyjnej zbliżoną do rozdzielczości uzyskiwanych przy zastosowaniu zaawansowanych algorytmów, jak np. technik regularyzacyjnych [11]. Wraz ze zwiększaniem się liczby impulsów zwiększa się rozdzielczość procedury, ale drastycznie rośnie jej wrażliwość na zakłócenia zawarte w zarejestrowanych danych. W praktyce do analizy danych *DLTS* znalazły zastosowanie funkcje: czteroimpulsowa *GS4* i sześćimpulsowa *GS6* [7]. Dla funkcji *GS6* można uzyskać rozdzielczość $e_{n1}/e_{n2} > 3,4$ [6].

Do analizy danych *PITS* wieloimpulsowe funkcje wagowe nie były dotychczas stosowane. Dlatego celem pracy jest zbadanie możliwości ich zastosowania w procedurze korelacyjnej do dwuwymiarowej analizy widmowej. Dwuwymiarowe widmo *PITS* we współrzędnych *szybkość emisji* i *temperatura* tworzy powierzchnię, na której uwidocznia się wpływ centrów defektowych w postaci fałd o liniach grzbietowych przebiegających zgodnie z równaniem Arrheniusa. Dwuwymiarowa analiza widmowa wykorzystująca procedurę korelacyjną z funkcją wagową typu *boxcar* była zastosowana do danych *PITS* dla Si napromieniowanego neutronami w pracy [12].

W niniejszej pracy przeprowadzono symulację zaników fotoprądu związanych z termiczną emisją elektronów z pułapek EB7, o parametrach $E_a = 0,3$ eV, $\sigma_n = 8,33E-14$ cm² w zakresie temperatur 140 K - 180 K. Pułapki EB7 zaobserwowano w próbce półizolującego krysztalu GaAs otrzymanego metodą Czochralskiego z hermetyzacją cieczową (*LEC*). Na podstawie tych zaników obliczono dwuwymiarowe widma *PITS* przy zastosowaniu metody korelacyjnej dla trzech rodzajów funkcji wagowych: funkcji dwuimpulsowej (typu *boxcar*), funkcji czteroimpulsowej (*GS4*) i funkcji sześćimpulsowej (*GS6*). Ponadto w pracy przedstawiono wpływ szumu na postać powierzchni widmowej obliczonej przy zastosowaniu funkcji *GS6*. Obliczone powierzchnie widmowe porównano z widmami eksperymentalnymi otrzymanymi na podstawie zarejestrowanych zaników fotoprądu dla tych pułapek.

2. ZASTOSOWANIE PROCEDURY KORELACYJNEJ DO OBLICZANIA DWUWYMIAROWYCH WIDM PITS

Zakładając istnienie wpływu składowej szumowej $i_s(t, T)$ przyjęto następującą wyrażenie opisujące zmiany niestacjonarnych przebiegów fotoprądu w funkcji temperatury

$$i(t, T) = \sum_{j=1}^J I_j(T) e_{nj}(T) \exp[-e_{nj}(T)t] + i_s(t, T) \quad (1)$$

gdzie I_j jest amplitudą składowej fotoprądowej związanej z j -tym centrum defektowym, e_{nj} jest szybkością emisji nośników z tego centrum.

Procedura korelacyjna polega na przekształceniu dwuwymiarowych przebiegów fotoprądu $i(t, T)$ w dwuwymiarowe widmo $S(T, e_n)$, zgodnie z równaniem:

$$S(T, e_n) = C \int_0^{t_w} i(t, T) w(t, e_n) dt \quad (2)$$

w którym $w(t, e_n)$ jest funkcją wagową, t_w jest szerokością okna pomiarowego, a C jest stałą normalizacyjną.

Wartość funkcji widmowej $S(T, e_n)$ osiąga maksimum w przypadku, gdy przebieg fotoprądu jest najbardziej skorelowany z funkcją wagową [3]. W wyniku działania przekształcenia określonego równaniem (2) otrzymujemy powierzchnię widmową $S(T, e_n)$,

$$e_{nj}(T) = A_j T^2 \exp\left(-\frac{E_{aj}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

na której występują fałdy związane z termiczną emisją nośników z centrów defektowych [12]. Linie grzbietowe tych fałd przebiegają zgodnie z równaniem Arrheniusa, w którym k_B jest stałą Boltzmana.

Parametry tego równania: stała $A_j = \gamma \sigma_j$ (σ_j - przekrój czynny na wychwyty, γ - stała materiałowa) i energia aktywacji E_{aj} , określają właściwości j -tego centrum defektowego.

Okna szybkości emisji e_n zadawane są przez dobór parametrów przyjętej funkcji wagowej i obliczane z warunku opisującego maksimum widma [4] $dS/dT = (dS/de_n)(de_n/dT) = 0$. Dla dwuimpulsowej funkcji wagowej typu boxcar stosunek czasów, w których próbkowane są zaniki fotoprądu, wynosi najczęściej $t_2/t_1=3$. Okno szybkości emisji wynosi wówczas $e_n = 1,23/t_1 = 3,69/t_2$.

3. WIELOIMPULSOWE FUNKCJE WAGOWE

Wielimpulsowa funkcja wagowa ma postać ciągu impulsów, które mogą mieć różne amplitudy, szerokości i odstępy. Zazwyczaj stosuje się parzystą liczbę impulsów o postaci funkcji δ Diraca. Wielimpulsową funkcję wagową można zatem przedstawić jako sumę

$$w_M(t) = \sum_{m=1}^M a_m \delta(t - t_m), \quad (4)$$

gdzie M jest liczbą impulsów, a_m ich amplitudą i t_m przesunięciem czasowym.

Korzystając z równań (2) i (4) powierzchnię widmową można zapisać jako sumę unormowanych wartości przebiegu fotoprądu w punktach czasowych t_m , w postaci [13]

$$S(T, e_n) = \sum_{m=1}^M a_m i(t_m, T) / i(0, T) \quad (5)$$

gdzie $i(0, T)$ jest wartością fotoprądu w momencie wyłączenia oświetlenia.

Impulsowe funkcje wagowe skonstruowane na podstawie algorytmu GS mają postać ciągu impulsów o różnych amplitudach i równych odstępach między nimi. Ich amplitudy można obliczyć z zależności [7]

$$a_m = (-1)^{m+(M/2)} \frac{\sum_{k=(m+1)/2}^{\min(m, M/2)} (2k)! k^{1+(M/2)}}{(M/2 - k)! k! (k-1)! (m-k)! (2k-m)!} \quad (6)$$

Punkty czasowe t_m są równo oddalone od siebie, tzn. $t_m = mt_1$, gdzie t_1 jest położeniem pierwszego impulsu. Suma amplitud impulsów funkcji wagowej równa się zero, tzn.:

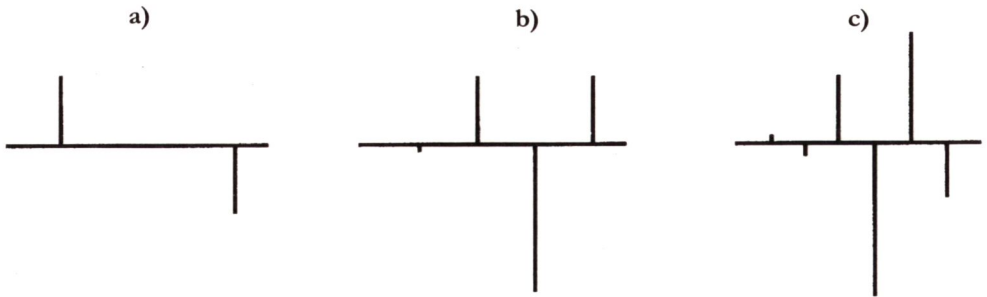
$$\sum_{m=1}^M a_m = 0 \quad (7)$$

Przybliżone postacie funkcji wagowych: dwuimpulsowej (*boxcar*) oraz utworzonych na podstawie algorytmu GS: czteroimpulsowej (GS4) i sześciimpulsowej (GS6), przedstawiono na Rys. 1.

Okna szybkości emisji e_n określa się dla impulsowych funkcji wagowych poprzez dobór położenia pierwszego impulsu t_1

$$e_n = \frac{\alpha}{t_1} \quad (8)$$

gdzie parametr α obliczany jest w sposób podany przez Look'a w [4].



Rys.1. Impulsowe funkcje wagowe: a) typu *boxcar*, amplitudy impulsów +1, -1; b) funkcja czteroimpulsowa GS4, amplitudy impulsów -1, +25, -48, +24; c) funkcja sześćoimpulsowa GS6, amplitudy impulsów: +1, -97, +1002, -2526, +2430, -810.

Fig.1. Waveforms of the multipulse weighting functions: a) the boxcar function, height of pulses: +1, -1; b) the four-pulse function (GS4), height of pulses: -1, +25, -48, +24; c) the six-pulse function (GS6), height of pulses: +1, -97, +1002, -2526, +2430, -810.

Wartości parametrów funkcji wagowych wieloimpulsowych: typu *boxcar*, GS2, GS4 i GS6 przedstawiono w tabeli 1. W tabeli tej zamieszczono również wartości współczynników α dla niestacjonarnych przebiegów pojemnościowych, typowych dla metody *DLTS*.

Tabela 1. Parametry impulsowych funkcji wagowych.

Table 1. The multipulse weighting function parameters.

Typ funkcji	Boxcar	GS2	GS4	GS6
Liczba impulsów	2	2	4	6
α (PITS)	1,23	1,45	1,02	0,88
α (DLTS)	0,55	0,69	0,69	0,69
a_1	1	2	-1	1
a_2	-1	-2	25	-97
a_3			-48	1002
a_4			24	-2526
a_5				2430
a_6				-810

Należy dodać, że do analizy niestacjonarnych przebiegów mogą być stosowane również wieloimpulsowe funkcje wagowe w postaci schodkowej, złożone z impulsów o równych szerokościach t_D w postaci [9]

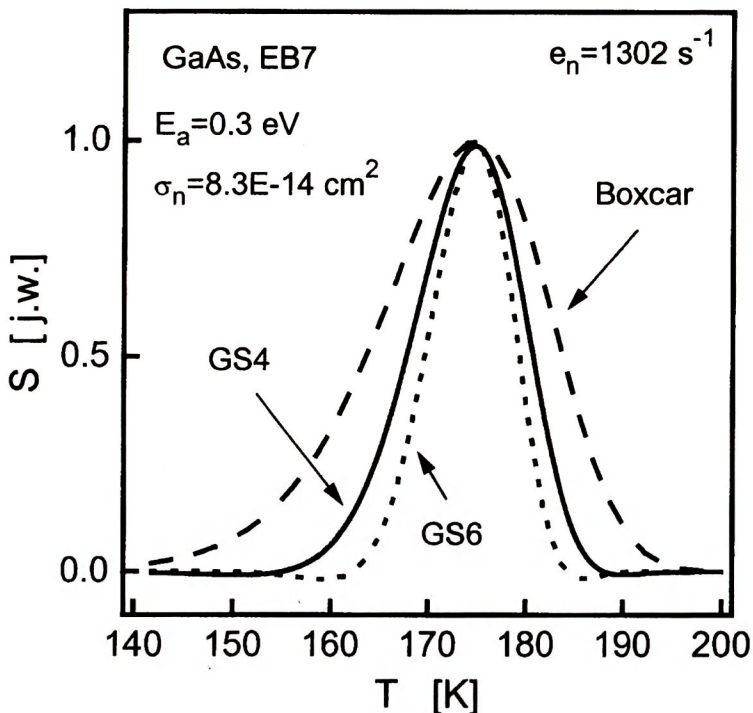
$$w_D(t) = \sum_{m=1}^M a_m \{1[t - (m-1)t_D] - 1(t - mt_D)\} \quad (9)$$

4. WPLYW POSTACI FUNKCJI WAGOWEJ NA DWUWYMIAROWE WIDMA PITS

W celu określenia wpływu postaci wieloimpulsowej funkcji wagowej na kształt dwuwymiarowych widm PITS obliczono z wykorzystaniem procedury korelacyjnej dwuwymiarowe widma $S(T, e_n)$ dla funkcji wagowych w postaci: funkcji typu *boxcar*, funkcji GS4 i funkcji GS6. Do obliczeń przyjęto opis matematyczny zaników zgodny z równaniem (1) oraz wartości parametrów defektu EB7: $E_{a1} = 0,3$ eV, $\sigma_{n1} = 8,33E-14$ cm², obserwowanego w zakresie temperatur 140-180 K w próbkach niedomieszkowanego LEC GaAs (ruchliwość Halla 5890 cm²/Vs, rezystywność 1,6E7 Ω cm²) [14]. Zależność amplitud składowych eksponencjalnych od temperatury oszacowano na podstawie wyników rejestracji zaników fotoprądu w tych próbkach. Dla przyjętego zakresu temperatur średnia amplituda zaniku, unormowana zgodnie z wzorem (6), wynosiła 0,34, a wartość składowej szumowej przyjęto równą zero.

Na Rys. 2 przedstawiono unormowane przekroje powierzchni widmowych otrzymane dla okna szybkości emisji $e_n = 1302$ s⁻¹ przy zastosowaniu funkcji wagowych typu *boxcar*, GS4 i GS6. Szerokość maksimum widma dla funkcji GS6, mierzona na połowie wysokości, wynosi 47% szerokości maksimum otrzymanego dla funkcji *boxcar*. Zatem rozdzielczość procedury korelacyjnej przy zastosowaniu funkcji GS6 jest dwukrotnie większa, niż przy zastosowaniu funkcji *boxcar*.

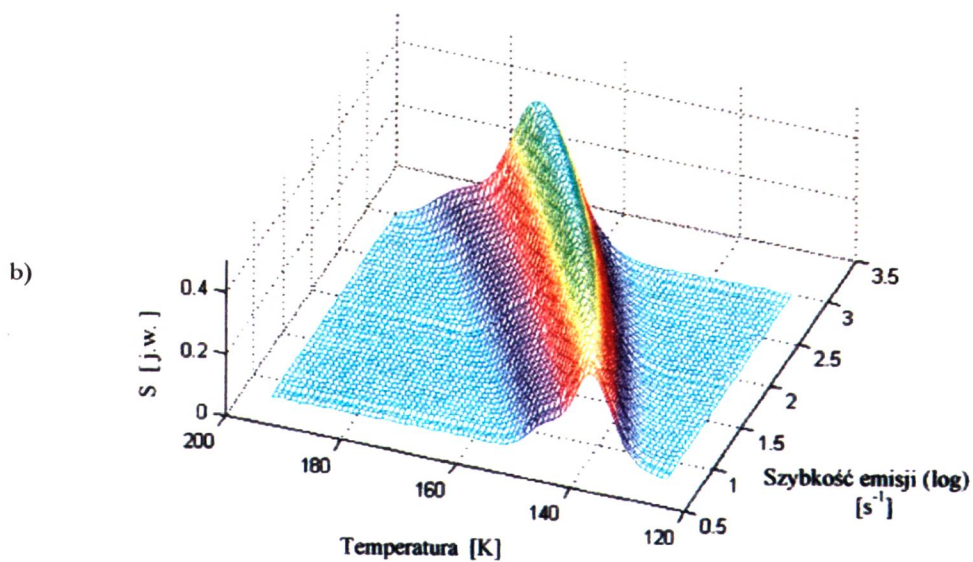
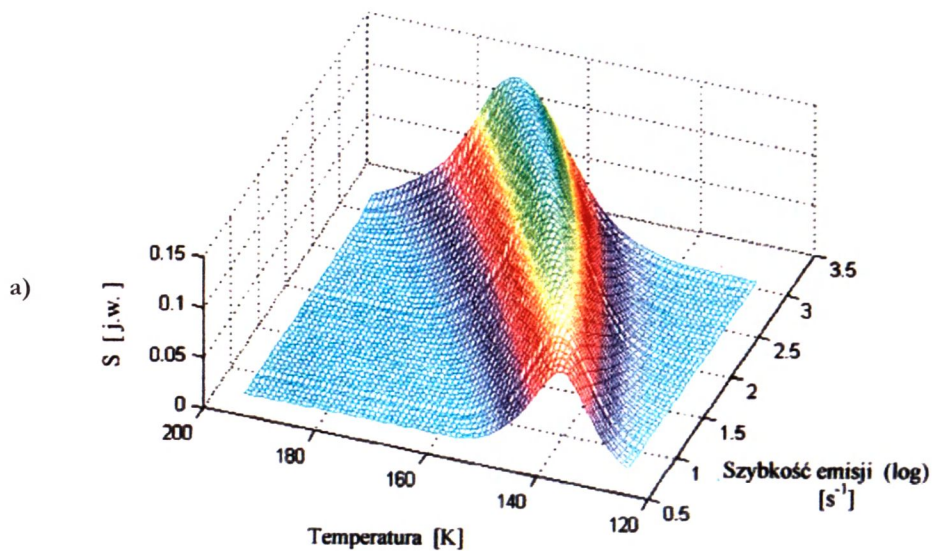
Możliwości rozdzielcze procedury korelacyjnej z wieloimpulsowymi funkcjami wagowymi można zilustrować, obliczając powierzchnię widmową dla dwu defektów, obserwowanych w tym samym zakresie temperatur i o zbliżonych parametrach. Założono, że oprócz defektu EB7 występuje w materiale drugi defekt o parametrach: energii aktywacji $E_{a2} = E_{a1} = 0,3$ eV i przekroju czynnym na wychwytywanie $\sigma_{n2} = 0,25$ $\sigma_{n1} = 2,08E-14$ cm². Przyjęto, że amplitudy symulowanych składowych eksponencjalnych związanych z drugim defektem wynoszą 30% wartości amplitud pierwszego defektu, tzn. równe $I_2 = 0,3I_1$. Na Rys. 3a, 3b i 3c przedstawiono obliczone powierzchnie widmowe dla funkcji wagowych odpowiednio: typu *boxcar*, GS4 i GS6. Na powierzchni widmowej dla funkcji typu *boxcar*, przedstawionej na Rys. 3a, występuje tylko jedna fałda i o istnieniu dwu defektów świadczy jedynie jej mała niesymetryczność. Rozdzielenie obydwu fałd jest trudne w tym przypadku i obliczone parametry defektów mogą być obciążone znacznymi błędami. Obecność drugiego defektu jest

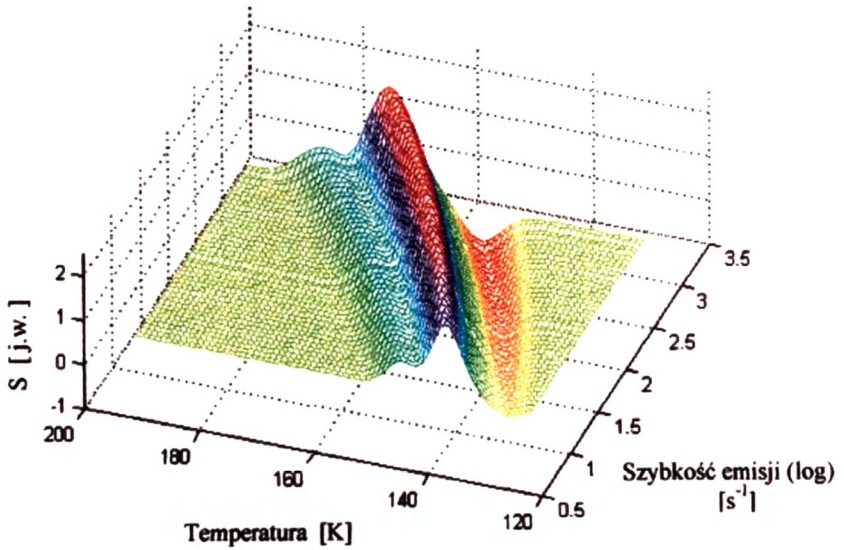


Rys 2. Porównanie szerokości przekroju fałd symulowanych powierzchni widmowych dla funkcji wagowych: typu *boxcar*, GS4 i GS6. Do obliczeń przyjęto wartości parametrów defektu EB7 obserwowanego w próbce niedomieszkowanego LEC GaAs. Szerokość połowkowa fałdy dla funkcji typu *boxcar* jest 2,12 razy większa w porównaniu z funkcją GS6.

Fig. 2. Comparison of the spectral surfaces cross-sections calculated for the three types of weighting functions: the *boxcar* function, the four-pulse function (GS4) and the six-pulse function (GS6). The calculations were made assuming the values of activation energy and capture-cross section for trap EB7 occurring in undoped LEC SI GaAs. The spectral surface obtained using the *boxcar* weighting function is 2.12 times wider than that of the six-pulse function (GS6).

wyraźnie widoczna na powierzchni widmowej dla funkcji GS4 pokazanej na Rys. 3b. Natomiast na powierzchni widmowej dla funkcji GS6, przedstawionej na Rys. 3c, fałdy dla obydwu defektów są rozdzielone i łatwe do zaobserwowania. Przebiegi czasowe, na podstawie których obliczono powierzchnię widmową przedstawioną na Rys. 3c, uzupełniono trzecią składową eksponencjalną o ujemnej amplitudzie. Relaksacje foto-prądu o ujemnej amplitudzie obserwowane są zarówno w GaAs, jak i w InP [14-15]. Wartości parametrów przyjęte do symulacji trzeciej składowej wynoszą: $E_{a3} = E_{a1} = 0,3 \text{ eV}$, $\sigma_{n3} = 10\sigma_{n1} = 8,33\text{E-}13 \text{ cm}^2$ oraz $I_3 = -0,3I_1$. Jak widać na powierzchni widmowej pojawia się tym przypadku dobrze widoczna dolina.





Rys 3. Powierzchnie widmowe obliczone przy zastosowaniu procedury korelacyjnej z wieloimpulsowymi funkcjami wagowymi dla dwu defektów o parametrach: $E_{a1} = 0,3$ eV, $\sigma_{n1} = 8,33E-14$ cm² (EB7) i $E_{a2} = 0,3$ eV, $\sigma_{n2} = 2,08E-14$ cm²: a) dla funkcji typu *boxcar*, b) dla funkcji czteroimpulsowej GS4; c) dla funkcji sześćoimpulsowej GS6.

Przebiegi czasowe, na podstawie których obliczono powierzchnię widmową przedstawioną na Rys. 3c, uzupełniono trzecią składową eksponencjalną o ujemnej amplitudzie. Wartości parametrów przyjęte do symulacji trzeciej składowej wynoszą: $E_{a3} = 0,3$ eV, $\sigma_{n3} = 8,33$ E-13 cm². Amplitudy składowych eksponencjalnych dla defektów drugiego i trzeciego wynoszą 30% amplitudy składowej odpowiadającej defektowi EB7 ($I_2 = +0,3I_1$ i $I_3 = -0,3I_1$).

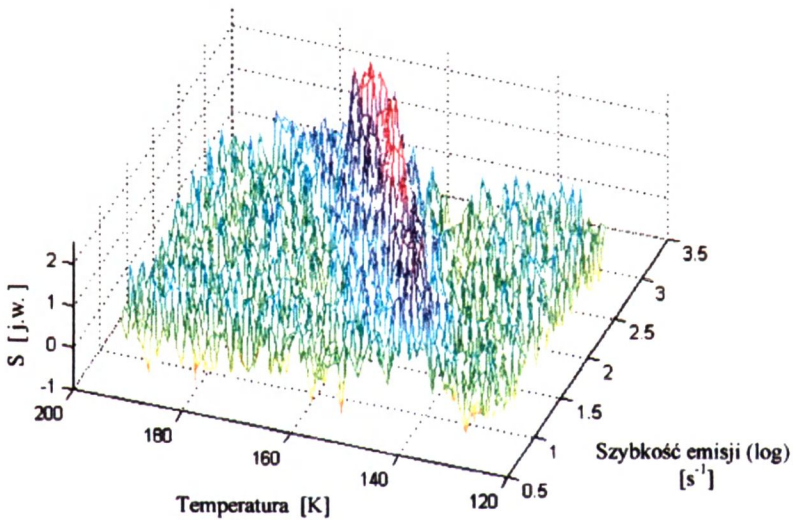
Fig. 3. Spectral surfaces simulated by using the correlation procedure with implementation of the multipulse weighting functions for two traps with the following parameters: $E_{a1} = 0.3$ eV, $\sigma_{n1} = 8.33E-14$ cm² (EB7) i $E_{a2} = 0.3$ eV, $\sigma_{n2} = 2.08E-14$ cm²: a) the boxcar function; b) the four-pulse function (GS4); c) the six-pulse function (GS6).

Photocurrent decays, used for calculations of the spectral surface shown in Fig. 3c, were completed with the third exponential component with a negative amplitude resulting from trap with $E_{a3} = 0.3$ eV, $\sigma_{n3} = 8.33$ E-13 cm². The amplitudes of the components related to the traps number 2 and 3 are equal to 30% of that for the trap EB7 ($I_2 = +0.3I_1$ i $I_3 = -0.3I_1$).

Istotną wadą procedury korelacyjnej wykorzystującej wieloimpulsowe funkcje wagowe jest jej wrażliwość na zakłócenia. Właściwość ta wynika z twierdzenia o wariancji sumy zmiennych losowych niezależnych. Przyjmując, że każdy składnik sumy (6) zawiera niezależną składową losową o odchyleniu standardowym σ_i , to w widmie $S(T, e_{\nu})$ pojawi się składowa losowa o odchyleniu standardowym σ_s , jako

$$\sigma_s = \sigma_1 \left(\sum_m a_m^2 \right)^{1/2} = \eta \sigma_1, \quad (10)$$

gdzie wartości współczynnika η dla rozpatrywanych funkcji wagowych typu *boxcar*, GS4 i GS6 wynoszą odpowiednio 1,41, 59 i 3735. Wynika stąd, że składowa losowa w widmie dla funkcji GS6 będzie o trzy rzędy wielkości większa niż w widmie dla funkcji wagowej typu *boxcar*. Przypadek symulowanego widma otrzymanego przy zastosowaniu funkcji wagowej GS6 do analizy zaników fotoprądu zawierających składową szumową pokazano na Rys. 4, odpowiadającemu Rys. 3c dla przypadku bez szumu. Do obliczeń przyjęto wartość składowej szumowej $\sigma_1 = 0,0005$. Odchylenie standardowe składowej losowej w widmie wynosi $\sigma_1 = 1,8$ przy maksymalnej amplitudzie fałdy 2,4. Jak widać z Rys. 4 fałda jest maskowana składową losową, a tylko jej szerokość może wskazywać na obecność dwu defektów o zbliżonych wartościach parametrów. Stosunek odchylenia standardowego składowej szumowej do średniej amplitudy zaniku wynosi $1,47 \times 10^{-4}$, natomiast stosunek odchylenia standardowego składowej losowej do średniej amplitudy fałdy widma wynosi 0,75. Wynika stąd, że zastosowanie wieloimpulsowej funkcji wagowej o dużej liczbie impulsów, jest możliwe jedynie w przypadku, kiedy zarejestrowane przebiegi fotoprądu zawierają bardzo małe składowe losowe. Poziom składowej losowej w zarejestrowanych przebiegach można zmniejszyć metodą uśredniania zgodnie z twierdzeniem o wariancji wartości średniej, co jednak znacznie wydłuża czas wykonania pomiarów.

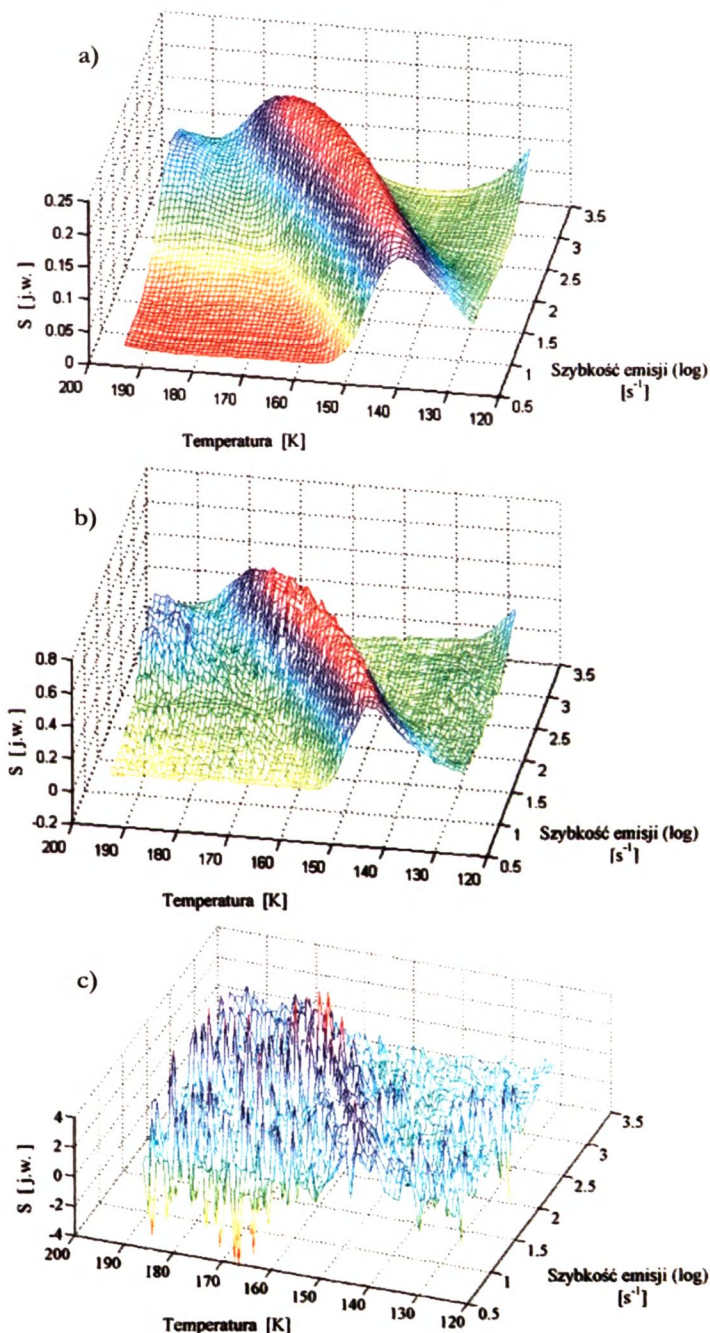


Rys 4. Powierzchnia widmowa obliczona przy zastosowaniu procedury korelacyjnej z funkcją wagową GS6 dla zaników fotoprądu zawierających składową szumową, odpowiadająca powierzchni przedstawionej na Rys. 3c dla przypadku bez szumu. Iloraz odchylenia standardowego składowej szumowej do średniej amplitudy zaników fotoprądu dla symulowanego defektu EB7 wynosi $1,47 \times 10^{-4}$. Odchylenie standardowe składowej losowej widma wynosi 1,8.

Fig. 4. Spectral surface simulated by using the correlation procedure with implementation of the multipulse weighting functions GS6 for analysis of the photocurrent decays containing a noise component. This surface corresponds to the that shown in Fig. 3c for the noiseless case. The noise to signal ratio in the simulated photocurrent decays is 1.47×10^{-4} . The standard deviation of the spectral surface random component is 1.8.

5. ANALIZA DANYCH EKSPERYMENTALNYCH

Wyniki symulacji porównano z eksperymentalnymi powierzchniami widmowymi obliczonymi na podstawie zarejestrowanych zaników fotoprądu dla defektu EB7 ob-



Rys. 5. Eksperymentalne powierzchnie widmowe otrzymane przy zastosowaniu procedury korelacyjnej z wieloimpulsowymi funkcjami wagowymi dla centrów EB7 o parametrach $E_a = 0,3$ eV, $\sigma_a = 8,33E-14$ cm^2 występujących w półzłożującym GaAs: a) dla funkcji typu *boxcar*; b) dla funkcji czteroimpulsowej GS4; c) dla funkcji sześciopulsowej GS6.

Powierzchnia widmowa dla funkcji GS6 pokazana na Rys. 5c, zawiera dużą składową losową, maskującą wpływ termicznej emisji elektronów.

Fig. 5. Spectral surfaces obtained by using the correlation procedure with implementation of the multi-pulse weighting functions to analysis of the photocurrent decays measured for the electron thermal emission from the trap EB7 ($E_a = 0.3$ eV, $\sigma_a = 8.33E-14$ cm^2): a) the *boxcar* function; b) the four-pulse function (GS4); c) the six-pulse function (GS6).

The effect of the electron thermal emission on the spectral surface for the weighting function GS6, shown in Fig. 5c, is masked by the random component.

serwowanego w próbce *LEC* GaAs. Na Rys. 5a, 5b i 5c przedstawiono powierzchnie widmowe dla funkcji wagowych typu *boxcar*, GS4 i GS6. Przedstawiona na Rys. 5a fałda dla funkcji typu *boxcar* jest szeroka, o niewielkiej asymetrii, co może świadczyć o istnieniu drugiej fałdy o mniejszej amplitudzie. Asymetria fałdy jest bardziej widoczna na powierzchni widmowej dla funkcji GS4, przedstawionej na Rys. 5b. Można zauważyć również pojawienie się składowej losowej w widmie.

Powierzchnia widmowa dla funkcji GS6, przedstawiona na Rys. 5c, zawiera dużą składową losową, praktycznie uniemożliwiającą dokładną analizę przebiegu fałdy. W zakresie większych szybkości emisji, fałda wyraźnie rozdwaja się i zmienia kierunek. Świadczy to o istnieniu w przebiegach czasowych zakłóceń skorelowanych z impulsami funkcji wagowej. Jak widać, poziom zakłóceń jest w zarejestrowanych przebiegach zbyt duży, aby można było skutecznie zastosować funkcję wagową o liczbie impulsów większej niż cztery.

6. PODSUMOWANIE

Wieloimpulsowe funkcje wagowe, skonstruowane na podstawie algorytmu GS, pozwalają na zwiększenie rozdzielczości procedury korelacyjnej służącej do analizy zaników fotoprądu w metodzie *PITS*. Szerokość fałdy na powierzchni widmowej jest 2,12 razy węższa dla funkcji sześciimpulsowej GS6 w porównaniu z powszechnie stosowaną funkcją typu *boxcar*. Zastosowanie wieloimpulsowych funkcji wagowych do obliczania powierzchni widmowej możliwe jest jednak tylko w przypadku, gdy zarejestrowane przebiegi czasowe zawierają bardzo małą składową losową. Warunek ten nakłada bardzo duże wymagania na system pomiarowy. Obwody niskosygnałowe muszą być szczególnie skutecznie ekranowane, a składową szumową generowaną przez badaną próbkę można zmniejszyć przez uśrednianie wyników pomiarów. Szczególnie jest to istotne w zakresie wyższych temperatur, gdzie pojawiają się szумы termiczne o znacznych amplitudach. W praktyce mogą znaleźć zastosowanie funkcje wagowe zawierające do sześciu impulsów (GS6). Zwiększenie liczby impulsów powoduje niewielką poprawę rozdzielczości oraz znaczny wzrost udziału składowej losowej w widmie. Funkcja wagowa wydłuża się, co wymaga również wydłużenia czasu rejestracji zaników.

W odróżnieniu od pomiarów *DLTS*, gdzie relaksacje pojemności mają amplitudy dodatnie i stałe w funkcji temperatury, zaniki fotoprądu w metodzie *PITS* mogą zawierać również składowe ujemne. Jak wykazały symulacje, w tym przypadku na powierzchni widmowej pojawiają się fałdy lub doliny, pozwalające na obliczenia parametrów defektów na podstawie przebiegu linii grzbietu fałdy lub dna doliny.

Wieloimpulsowe funkcje wagowe w przyszłości będą mogły znaleźć zastosowanie w procesie wyznaczania parametrów centrów defektowych projektowanym jako pomiar systemowy [16], w którym dobierana jest struktura modelu matematycznego,

służącego do opisu zjawiska fizycznego wykorzystywanego w danej metodzie pomiarowej. Zakłada się przy tym, że obliczenia będą wykonywane w czasie rzeczywistym. Na podstawie wyników analizy przeprowadzanej na bieżąco dobierane będą optymalne warunki pomiaru, parametry rejestracji i algorytmy obliczeniowe, stosownie do właściwości zjawisk obserwowanych w danym zakresie temperatur. Łatwość implementacji i dobra rozdzielczość procedury korelacyjnej uzyskiwana za pomocą wieloimpulsowych funkcji wagowych wskazują na ich szczególną użyteczność w tym zastosowaniu.

Praca wykonana została w ramach zadania badawczego statutowego WAT nr PBS 645/2001.

PODZIĘKOWANIE

Szczególne podziękowanie autorzy kierują do doc. dr hab. inż. Pawła Kamińskiego z Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych za cenne dyskusje podczas powstawania artykułu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Lang D. V.: Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *J.Appl.Phys.*, 45, 7, 1974, 3023-3032
- [2] Hurtes C., Boulou M., Mitonneau A. and Bois D.: Deep-level spectroscopy in high-resistivity materials. *Appl. Phys. Lett.* 32, 1978, 821-823
- [3] Miller G. L., Ramirez J. V., Robinson D. A. H.: A correlation method for semiconductor transient signal measurements. *J.Appl.Phys.*, 46, 6, 1975, 2638-2644
- [4] Look D. C.: The electrical and photoelectronic properties of semi-insulating GaAs. *Semiconductors and semimetals*. Ed. Willardson R.K., Beer A. C., New York: Academic Press 19, 1983, 76,
- [5] Kamiński P.: Zastosowanie niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów do badania struktury defektowej półprzewodników typu A^{III}B^V. *Prace ITME*, z. 36, 1991, 126
- [6] Istratov A. A.: The resolution limit of traditional correlation functions for deep level transient spectroscopy. *Rev. Sci. Instrum.*, 68, 10, 1997, 3861-3865
- [7] Nolte D. D., Haller E. E.: Optimization of energy resolution of deep level transient spectroscopy. *J. Appl. Phys.*, 62, 3, 1987, 900-906
- [8] Gaver D. P. Jr: Observing stochastic processes, and approximate transform inversion. *Oper. Res.* 3, 1966, 444-459

- [9] Stehfest H.: Numerical inversion of laplace transforms, 1970, Communications of the ACM, 13, 1, 1970, 47-49
- [10] Istratov A. A.: Exponential analysis in physical phenomena. Rev. Sci. Instrum, 70, 2, 1999, 1233-1257
- [11] Provencher S.W.: A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic and integral equations. Comp. Phys. Comm. 1982, 27, 213-228
- [12] Pawłowski M.: Dwuwymiarowość widm w niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej. Materiały Elektroniczne, 28, 2000, 1/2, 18-30
- [13] Kozłowski R., Pawłowski M., Kamiński P. i Ćwirko J.: Electronic properties of grown-in defects in semi-insulating GaAs. International Conference on Solid State Crystals '98, 12-16 October 1998, Zakopane, Proc. SPIE: Epilayers and heterostructures in optoelectronics and semiconductor technology, 3725, 209-213
- [14] Kozłowski R. i Kamiński P.: Analiza porównawcza struktury defektowej półizolujących kryształów GaAs badanej za pomocą niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej HRPITS. Warszawa: ITME 2000. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej.
- [15] Kamiński P., Pawłowski M., Ćwirko R., Palczewska M. i Kozłowski R.: Investigation of deep-level defects in semi-insulating GaAs and InP by analysis of photo-induced current transient. Fourth International Workshop on Beam Injection Assessment of Defects in Semiconductors, June 3-6, 1996, El Escorial, Spain, Materials Science and Engineering B42, 213-216
- [16] Jaworski J. M.: Pomiar, model, eksperyment, identyfikacja, XXVII Międzyuczelniana konferencja metrologiczna MKM'96, 22-25 września 1996, Częstochowa, Polska, Materiały konferencyjne, Tom 1, 244-247

APPLICATION OF THE CORRELATION PROCEDURE WITH MULTIPULSE WEIGHTING FUNCTIONS TO THE TWO-DIMENSIONAL SPECTRAL ANALYSIS IN PHOTOINDUCED TRANSIENT SPECTROSCOPY PITS

SUMMARY

An application of the correlation procedure with multipulse weighting functions to the two-dimensional spectral analysis in photoinduced transient spectroscopy *PITS* is proposed. Multipulse weighting functions, constructed on the ground of the Gaver-Stehfest algorithm for the Laplace reverse transformation, give the better resolution of the *PITS* method than the commonly used two-pulse boxcar weighting function. For the electron thermal emission from traps EB7, occurring in semi-insulating (SI) GaAs crystals, the spectral surfaces for the three types of weighting functions: the boxcar function, the four-pulse function (GS4) and the six-pulse function (GS6) were calculated. The calculated spectral surfaces were compared with those obtained from experimental photocurrent transients for traps EB7.