

ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI HOUGH'A DO ANALIZY DWUWYMIAROWYCH WIDM PITS

Michał Pawłowski^{1,2}

Metodę niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej (PITS) z zastosowaniem procedury rozpoznawania obrazów wykorzystano do badania centrów defektowych w materiałach wysokorezystywnych. Termiczna emisja nośników ładunku z centrów defektowych manifestuje się na powierzchni widmowej PITS w postaci fałd, których grzbiety przebiegają wzdłuż linii opisywanych równaniem Arrheniusa. Do wyznaczenia parametrów centrów defektowych na podstawie przebiegu linii grzbietowych fałd zaproponowano transformację Hough'a. Nowa metoda została zastosowana do analizy powierzchni widmowej PITS wyznaczonej dla kryształu SI GaAs otrzymanego metodą pionowego przesuwu gradientu temperatury (VGF). Obraz temperaturowych zmian szybkości emisji wyznaczony metodą Hough'a porównano z obrazem otrzymanym metodą aproksymacji neuronowej.

1. WSTĘP

W niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej (PITS), zaimplementowanej w inteligentnym systemie pomiarowym w ITME [1], parametry centrów defektowych w kryształach materiałów wysokorezystywnych wyznaczone są dwuetapowo. W pierwszym etapie temperaturowe zmiany niestacjonarnych przebiegów fotoprądu analizowane są za pomocą procedury korelacyjnej [2] i algorytmu wykorzystującego odwrotną transformatę Laplace'a [3-5], w wyniku których otrzymywane są powierzchnie widmowe we współrzędnych temperatura-szybkość emisji, zawierające fałdy związane z termiczną emisją nośników ładunku z centrów defektowych [6]. Widmo korelacyjne, dające dobry jakościowy obraz struktury defektowej, cechuje niska rozdzielczość linii grzbietowych fałd związanych z centrami defektowymi charakteryzującymi się zbliżonymi temperaturowymi zależnościami szybkości emisji. Fałdy występujące w widmie Laplace'a są znacznie węższe niż w widmie korelacyjnym, co umożliwia wyznaczenie parametrów znacznie większej liczby centrów

¹ Wojskowa Akademia Techniczna, ul. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

² Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
email: michal.pawlowski@itme.edu.pl

defektowych. Rezultaty otrzymywane za pomocą procedury Laplace'a nie zawsze są jednak jednoznaczne. W przypadku znacznej składowej szumowej w zanikach fotoprądu, na powierzchni widmowej Laplace'a powstają bowiem elementy widma nie związane z termiczną emisją nośników ładunku z centrów defektowych. W drugim etapie, parametry centrów defektowych wyznaczone są poprzez aproksymację linii grzbietowych fałd równaniem Arrheniusa:

$$e_r = AT^2 \exp(-E_a/k_B T) \quad (1)$$

gdzie: E_a jest energią aktywacji, A jest stałą zależną od właściwości danego centrum defektowego, T reprezentuje temperaturę, a k_B jest stałą Boltzmana. Aproksymacja wykonywana jest za pomocą sieci neuronowej [2, 7], która do wybranych obszarów fałd na wyznaczonej eksperymentalnie powierzchni widmowej dopasowuje dwuwymiarową funkcję ciągłą zawierającą w swoim opisie równanie Arrheniusa. Parametry centrum defektowego obliczane są bezpośrednio na podstawie wartości wag sieci otrzymanych po procesie jej uczenia. W przypadku wystąpienia fałd nie poddających się aproksymacji neuronowej (nieregularnych, rozmytych lub o charakterze wyspowym), do określenia parametrów linii grzbietowej wybranej fałdy wykorzystuje się aproksymator wizualny. Umożliwia on eksperymentatorowi dopasowanie linii opisanej równaniem Arrheniusa do przebiegu grzbietu fałdy bezpośrednio na obrazie powierzchni widmowej wyświetlanej w oknie głównym interfejsu użytkownika systemu pomiarowego [5].

Automatyzacja systemów pomiarowych, umożliwiającą sprawną rejestrację dużych zbiorów danych, powoduje konieczność zastosowania efektywnych metod programowych do ich przetwarzania. Stosowane dotychczas procedury aproksymacji neuronowej i wizualnej nie są efektywne, gdyż umożliwiają wyznaczanie parametrów rodzajów centrów defektowych na podstawie przebiegu pojedynczych fałd na powierzchni widmowej wybieranych kolejno do analizy. Istotne jest zatem opracowanie metody umożliwiającej analizę całej powierzchni widmowej i ekstrakcję z niej jednocześnie, z określoną dokładnością, parametrów możliwie największej liczby linii grzbietowych. Taka procedura pozwoli na znaczne przyspieszenie procesu obliczeń oraz odciążenie eksperymentatora z konieczności ręcznego wyboru i oddzielnej analizy kolejnych wycinków powierzchni widmowej. Do takich celów szczególnie przydatne są metody rozpoznawania wzorców z dziedziny przetwarzania obrazów. W przypadku analizy obrazów struktury defektowej materiału półzłożonego tworzonych na podstawie dwuwymiarowych widm PITS, wzorcem jest obiekt będący linią opisywaną równaniem Arrheniusa (1). Obiekty takie mogą być poszukiwane w obrazie utworzonym przez rzuty punktów grzbietu fałd występujących na powierzchni widmowej na płaszczyznę (T, e_r) . Przedstawienie dwuwymiarowego widma we współrzędnych $1/T$ i $\ln(T^2/e_r)$ powoduje, że obiektem wzorcowym jest linia prosta o równaniu:

$$\ln\left(\frac{T^2}{e_T}\right) = \frac{E_a}{k_B} \frac{1}{T} - \ln A \quad (2)$$

Do wyznaczania parametrów prostych Arrheniusa w dwuwymiarowym obrazie rzutów linii grzbietowych wybrano transformatę Hough'a (HT) [8]. Została ona opracowana do znajdowania w dwukolorowym obrazie zbiorów punktów układających się wzdłuż linii prostych. Transformatę Hough'a cechuje szereg korzystnych cech, szczególnie przydatnych do wykorzystania w inteligentnych systemach pomiarowych. Położenie każdego punktu obrazu analizowane jest niezależnie od innych, dzięki czemu transformata Hough'a HT pozwala na rozpoznawanie wielu obiektów równocześnie, w tym również częściowo zniekształconych. Oznacza to małą wrażliwość algorytmu na zakłócenia szumowe w obrazie i pozwala na analizę obrazów słabej jakości.

W ramach niniejszej pracy przedstawiono algorytm wykorzystujący transformację Hough'a do analizy dwuwymiarowych widm korelacyjnych i Laplace'a. Opisano właściwości transformacji zastosowanej do wykrywania linii prostych opisanych równaniem Arrheniusa wzdłuż których układają się linie grzbietowe fałd na powierzchni widmowej. Opracowany algorytm zastosowano następnie do badania wzrostowych centrów defektowych w kryształach półizolującego (semi-insulating) SI) GaAs. Parametry centrów defektowych obliczano bezpośrednio na podstawie położenia wykrytych prostych. Wyznaczone wartości parametrów wykazują dużą zbieżność z wartościami otrzymanymi metodą aproksymacji neuronowej fałd w dwuwymiarowych widmach Laplace'a oraz wartościami wyznaczonymi poprzez analizę jednowymiarowych widm korelacyjnych. Osiągnięte rezultaty będą wykorzystane przy opracowywaniu nowych procedur obliczeniowych, zwiększających efektywność procesu wyznaczania parametrów centrów defektowych w kryształach materiałów wysokorezystywnych.

2. ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI HOUGH'A DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW CENTRÓW DEFECTOWYCH NA PODSTAWIE DWUWYMIAROWYCH WIDM PITS

2.1. Klasyczna transformacja Hough'a

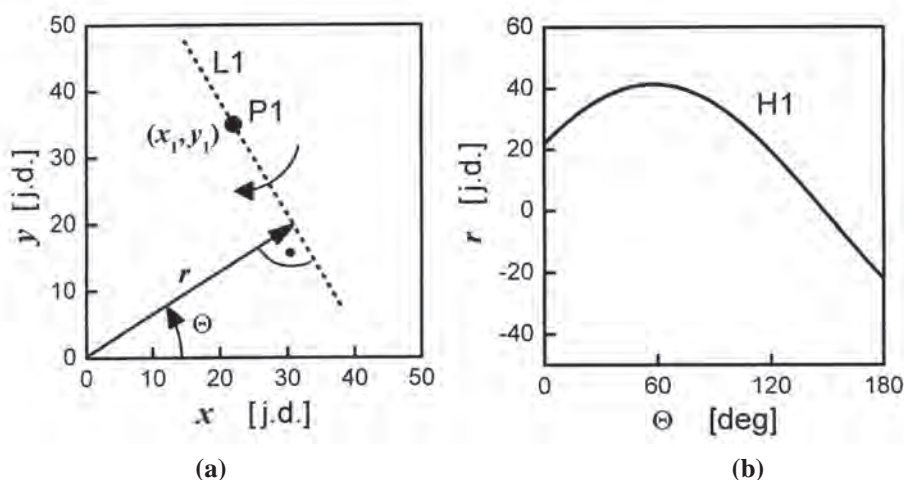
Transformacja Hough'a dla linii prostych [8] odwzorowuje linię opisaną równaniem kierunkowym $y = ax + b$ w przestrzeni danych - o współrzędnych (x, y) , w punkt w przestrzeni Hough'a - o współrzędnych (r, θ) , reprezentujących parametry tej prostej opisanej równaniem parametrycznym:

$$r = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (3)$$

gdzie: r jest odległością prostej od początku układu współrzędnych (wzdłuż normalnej), zaś θ jest kątem pomiędzy normalną do prostej, a osią odciętych. Relacje pomiędzy parametrami obu równań prostej są następujące:

$$r = \frac{b}{\sqrt{a^2 + 1}}, \quad \sin \Theta = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad \text{oraz} \quad a = -\frac{\cos \Theta}{\sin \Theta}, \quad b = \frac{r}{\sin \Theta} \quad (4)$$

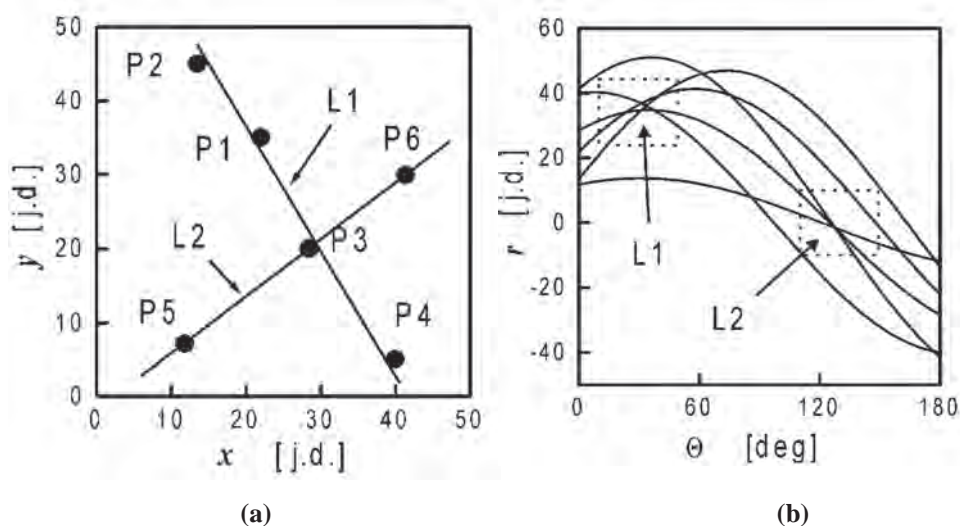
Ilustrację graficzną przekształcenia Hough'a przedstawiono na Rys. 1a, gdzie pokazany jest punkt P1 w przestrzeni danych i przechodząca przez niego prosta L1. Jeśli prosta L1 będzie obracana wokół punktu P1, to w przestrzeni (r, Θ) (parametrów) zostanie wykreślona krzywa H1 (Hough'a) o równaniu $r = x_1 \cos(\Theta) + y_1 \cos(\Theta)$, gdzie (x_1, y_1) są współrzędnymi punktu P1. Krzywa ta, przedstawiona na Rys. 1b, jest obrazem wszystkich prostych przechodzących przez punkt P1. Łatwo zauważyć, że przy przejściu obracanej prostej przez punkt (0,0) występuje skokowa zmiana kąta Θ o wartość 180° . Zatem krzywa H1 nie istnieje w pewnym przedziale wartości kąta Θ o szerokości 180° , którego położenie zależy od wartości współrzędnych (x_1, y_1) . W celu ułatwienia interpretacji przyjęto przedstawiać krzywą Hough'a w zakresie kątów $0 \leq \Theta \leq 180^\circ$, przy czym punkty o współrzędnych $(r, \Theta + 180^\circ)$ zostały opisane współrzędnymi o wartościach $(-r, \Theta)$.



Rys. 1. Ilustracja przekształcenia Hough'a: (a) prosta L1 przechodząca przez punkt P1 o współrzędnych (x_p, y_p) w przestrzeni danych, (b) krzywa H1 opisywana równaniem $r = x_p \cos(\Theta) + y_p \cos(\Theta)$ w przestrzeni parametrów będąca odwzorowaniem wszystkich położań prostej L1 wokół punktu P1.

Fig. 1. Illustration of the Hough transformation: (a) the line L1 going through the point P1 with the coordinates (x_p, y_p) in the data space, (b) the curve H1 given by the equation $r = x_p \cos(\Theta) + y_p \cos(\Theta)$ in the parameters' space mapping the all directions of the line L1 around the point P1.

W przypadku, gdy przestrzeń danych zawiera wiele punktów, w przestrzeni (r, θ) pojawia się zbiór związanych z nimi krzywych. Przykładowy zbiór sześciu punktów P1-P6 i odpowiadający mu zbiór krzywych Hough'a przedstawiono na Rys. 2. Jeśli punkty te nie są położone dokładnie na prostej, to w przestrzeni parametrów pojawia się grupa indywidualnych przecięć, odpowiadających prostym przechodzącym przez wszystkie pary tych punktów. Przykładem takiego układu są punkty P1-P4 położone w sąsiedztwie prostej L1, (Rys. 2a) i odpowiadający mu zbiór sześciu przecięć (Rys. 2b). Natomiast dla punktów P3, P5 i P6 leżących na prostej L2, krzywe w przestrzeni parametrów przecinają się dokładnie w jednym miejscu. Wspólny punkt przecięcia krzywych Hough'a w przestrzeni (r, θ) wskazuje zatem parametry prostej aproksymującej punkty w przestrzeni (x, y) . Im mniejsza jest korelacja współrzędnych punktów w przestrzeni danych, tym obszar przecięć w przestrzeni parametrów będzie rozleglejszy.

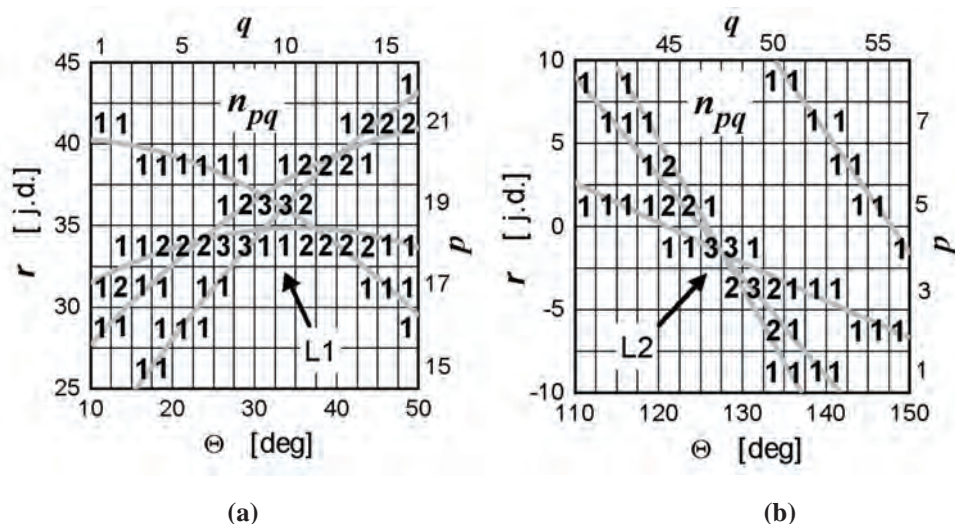


Rys. 2. Ilustracja transformacji Hough'a dla linii prostych: (a) zbiór punktów P1-P6 w przestrzeni danych (x, y) , (b) krzywe Hough'a w przestrzeni (r, θ) odpowiadające punktom P1-P6. Wspólny punkt przecięcia trzech krzywych w przestrzeni (r, θ) wskazuje, że odpowiadające im punkty w przestrzeni (x, y) leżą dokładnie na prostej L2. Dla punktów w przestrzeni danych, nie leżących dokładnie na prostej L1, krzywe nie przecinają się w jednym punkcie. Występuje sześć punktów przecięcia skupionych w pewnym obszarze przestrzeni (r, θ) .

Fig. 2. The Hough transformation for the straight lines: (a) the set of points P1-P6 in the space (x, y) , (b) the Hough curves in the space (r, θ) corresponding to the points P1-P6. The cross point common for three curves in the space (r, θ) indicates that the corresponding points in the space (x, y) are located exactly on the line L2. For the points in the space (x, y) not lying exactly on the line L1 there are six cross points located in a certain area of the space (r, θ) .

W przypadku obrazu przestrzeni parametrów o dużej złożoności występują trudności z jego interpretacją. Pojawia się zatem problem poszukiwania obszarów przecięć w obrazie transformaty.

Powszechnie stosowana metoda poszukiwania parametrów prostych aproksymujących zbiory liniowo rozłożonych punktów polega na podziale przestrzeni (r, Θ) na elementarne komórki przez nałożenie na nią prostokątnej siatki, a następnie na utworzeniu dwuwymiarowego histogramu obrazującego liczbę krzywych Hough'a przechodzących przez tak utworzone komórki. Współrzędne komórek histogramu z aksimami lokalnymi wskazują parametry prostych, wzdłuż których rozłożonych jest najwięcej punktów. Histogramy tablicowe dla wybranych obszarów przecięć zaznaczonych prostokątami L1 i L2 na Rys. 2b są przedstawione odpowiednio na Rys. 3a i na Rys. 3b. Na przedstawione wycinki przestrzeni (r, Θ) nałożona została siatka tworząca komórki o wymiarach $\Delta r = 2,5$ i $\Delta \Theta = 2,5^\circ$. W komórki wpisane zostały wartości n_{pq} odpowiadające liczbom krzywych przechodzących przez poszczególne komórki.



Rys. 3. Histogramy tablicowe wybranych obszarów przestrzeni (r, Θ) przedstawionych na Rys. 2b. (a) Histogram obszaru oznaczonego etykietą L1, (b) histogram obszaru oznaczonego etykietą L2. Histogramy obrazują liczby krzywych Hough'a przebiegających przez poszczególne komórki. Widoczne jest znacznie większe zróżnicowanie rozkładu liczb Hough'a w przypadku obszaru L1 niż w przypadku obszaru L2. Liczby p i q określają położenie komórki histogramu.

Fig. 3. Area histograms of the selected regions of the space (r, Θ) shown in Fig. 2b. (a) histogram of the region labeled L1, (b) histogram of the region labeled L2. The histograms show a number of Hough curves crossing every bin. The region L1 is poorly defined, with many adjacent bins having similar values. In the case of the region L2, the sharp distribution of the bin values is seen. The letters p and q determine the bin position.

gólne komórki. Indeksy p i q wskazują położenie danej komórki. Dla zwiększenia czytelności histogramu puste pozostawiono komórki, przez które nie przebiega żadna krzywa. Histogram z Rys. 3a przedstawia trudne do interpretacji rozmyte maksimum. Można zauważyć, że zmniejszanie wymiarów komórek nie prowadzi w tym przypadku do zwiększenia dokładności lokalizacji maksimum. Liczba krzywych przechodzących przez poszczególne komórki zmniejszy się, przez co maksimum ulegnie dalszemu rozmyciu. Natomiast zmniejszanie wymiarów komórek histogramu pokazanego na Rys. 3b nie zmieni w sposób znaczący jego postaci ze względu na liniowy charakter krzywych w otoczeniu punktu przecięcia. Można w ten sposób uzyskać poszukiwane parametry prostej L2 z wystarczającą dokładnością. Problemy interpretacyjne pojawiają się w przypadku obrazów o dużej złożoności, kiedy obraz przestrzeni Hough'a jest mało czytelny. Dodatkowo wartość lokalnego maksimum w histogramie odpowiadającego odcinkowi liniowemu składającego się z niewielu punktów, jest względnie mała w porównaniu z maksimum reprezentującym długi odcinek o niewielkim rozproszeniu, z gęsto usytuowanymi punktami.

Z zasady tworzenia histogramu wynika podstawowa wada algorytmu, a mianowicie jego mała rozdzielczość. Kwantyzacja przestrzeni (r, Θ) pozwala na wyznaczenie parametrów prostej aproksymującej zbiór idealnie liniowo położonych punktów z rozdzielczością odpowiadającą wymiarom komórki histogramu. Zmniejszanie błędu kwantyzacji poprzez zmniejszenie rozmiarów komórek nie jest możliwe w przypadku, gdy punkty tworzą nieidealnie układy liniowe. Taką właściwość wykazuje obraz rzutów punktów wyznaczających przebieg linii grzbietowych fałd eksperymentalnych powierzchni widmowych na płaszczyznę o współrzędnych $[1000/T, \ln(T^2/e_r)]$, określającą przestrzeń danych. Zarejestrowane zaniki fotonu z reguły zawierają znaczne składowe szumowe, przez co punkty odwzorowujących przebieg linii grzbietowych widma charakteryzują się znacznym rozrzutem. Wadą metody Hough'a jest jej czasochłonność, wynikająca z konieczności analizy przebiegu wszystkich krzywych występujących w całej przestrzeni parametrów.

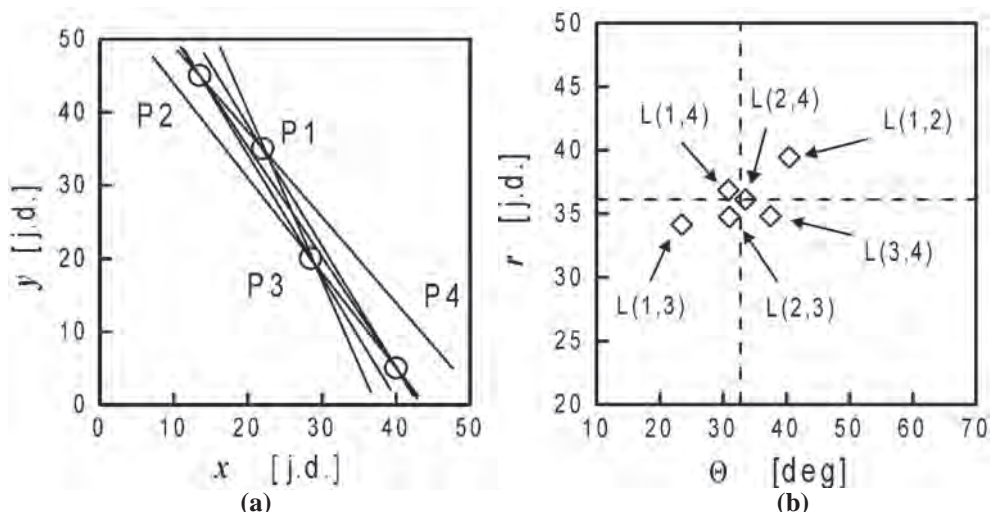
2.2. Proponowany algorytm wyznaczania obszaru z przecięciami

Do analizy przebiegu rzutów linii grzbietowych opracowano metodę polegającą na analitycznym wyznaczeniu współrzędnych przecięć krzywych w przestrzeni (r, Θ) , odpowiadających liniom prostym przechodzącym przez wszystkie pary punktów w przestrzeni (x, y) . Współrzędne punktów przecięć naniesione na wykres parametrów (r, Θ) tworzą skupiska, których lokalne zagęszczenia wskazują na istnienie w obrazie danych zbioru punktów układających się zgodnie z równaniem Arrheniusa. Można przyjąć, że współrzędne środków skupisk określają poszukiwane parametry prostych opisujących przebiegi linii grzbietowych. Problem zatem sprowadza się do wyznaczenia położenia środka każdego skupiska z możliwie najlepszą dokładnością.

Parametry prostych $a(i,j)$ i $b(i,j)$ przechodzących przez pary punktów $[(x_i, y_i), (x_j, y_j)]$ można obliczyć z zależności:

$$\begin{cases} a(i, j) = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} & \text{dla } i < j \\ b(i, j) = y_i - a(i, j)x_i \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: i, j są numerami punktów. Następnie korzystając z zależności (4) można wyznaczyć współrzędne punktów odpowiadające tym prostym w przestrzeni Hough'a $r(i,j)$ i $\Theta(i,j)$. Ilustracja sposobu wyznaczania parametrów prostej aproksymującej w przypadku rozrzutu punktów w przestrzeni (x, y) została przedstawiona na Rys. 4. Na Rys. 4a przedstawiono zbiór czterech punktów P1–P4, modelujących fragment



Rys. 4. Sposób wyznaczania parametrów prostej aproksymującej w przypadku rozrzutu punktów w przestrzeni (x,y) : (a) zbiór sześciu prostych przechodzących przez wszystkie pary punktów P1-P4, (b) punkty w przestrzeni (r,Θ) odpowiadające parametrom prostych $L(i,j)$ w przestrzeni (x,y) , gdzie i i j są wskaźnikami określającymi parę punktów. Liniami przerywanymi zaznaczono wartości r i Θ dla prostej regresji aproksymującej rozkład punktów P1-P4. Wartości parametrów regresji prostej są zbliżone z wartościami średnimi współrzędnych r i Θ punktów $L(i,j)$.

Fig. 4. The method of determination of the straight line parameters in the case of the approximation of the points dispersed in the space (x,y) : (a) the set of six lines going through all the pairs of points P1-P4, (b) the points in the space (r,Θ) corresponding to the parameters of the lines $L(i,j)$ in data space (x,y) , where i and j are indices determining the point pair. The dash lines indicate the values of r and Θ obtained for the regression line matching the points P1-P4. The values of the regression line parameters are similar with the average values of the coordinates r and Θ for the points $L(i,j)$.

rzutu linii grzbietowej i sześć prostych przechodzących przez wszystkie pary tych punktów. Natomiast Rys. 4b przedstawia wykres przestrzeni Hough'a, z punktami odpowiadającymi parametrom prostych $L(i,j)$. Liniami przerywanymi zaznaczono wartości parametrów $r = 36,07^\circ$ i $\Theta = 32.73^\circ$ dla prostej regresji aproksymującej rozkład punktów P1-P4. Wartości te są praktycznie równe średnim obliczonym dla każdego parametru osobno. Błędy względne, popełniane przy przyjęciu parametrów prostej w postaci wartości średnich w porównaniu do parametrów prostej regresji, są rzędu $1,5 \times 10^{-3}$ dla obu parametrów. W praktyce wygodniejsze jest przedstawienie przestrzeni parametrów w kartezjańskim układzie współrzędnych (a, b) wyrażonych poprzez energię aktywacji E_a i współczynnik A w równaniu Arrheniusa dla przestrzeni danych.

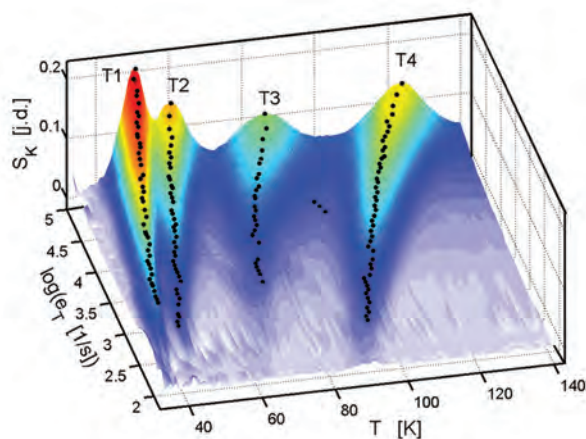
2.3. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA TRANSFORMACJI HOUGH'A DO ANALIZY KORELACYJNEJ POWIERZCHNI WIDMOWEJ

Opracowaną zmodyfikowaną metodę Hough'a zastosowano do automatycznej ekstrakcji parametrów centrów defektowych z dwuwymiarowych widm PITS. Do badań wybrano eksperymentalną powierzchnię widmową przedstawioną na Rys. 5, wyznaczoną za pomocą procedury korelacyjnej dla centrów radiacyjnych w kryształ Si:Sn, na podstawie relaksacyjnych przebiegów fotoprądu zmierzonych w zakresie temperatur 35 K – 140 K. Kryształ Si:Sn (próbka #8a6) otrzymano metodą topienia strefowego (FZ) oraz napromieniowano dawką neutronów $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-1}$ o energii 1 MeV. Otrzymana powierzchnia widmowa charakteryzuje się występowaniem czterech fałd o wyraźnie zaznaczonych liniach grzbietowych, związanych z termiczną emisją nośników ładunku z pojedynczych rodzajów centrów defektowych T1, T2, T3 i T4. Na rysunku punktami zaznaczono przebiegi linii grzbietowych poszczególnych fałd. Następnie utworzono przestrzeń danych do transformacji Hough'a poprzez rzutowanie linii grzbietowych na płaszczyznę $[x = \ln(T^2/e_T), y = 10^3/T]$, przedstawioną na Rys. 6. Dla tak zdefiniowanej przestrzeni (x, y) równanie Arrheniusa (1) przyjmie postać:

$$\frac{1}{T} = \frac{k_B}{E_a} \cdot \ln\left(\frac{T^2}{e_T}\right) + \frac{k_B}{E_a} \cdot \ln(A) \quad (6)$$

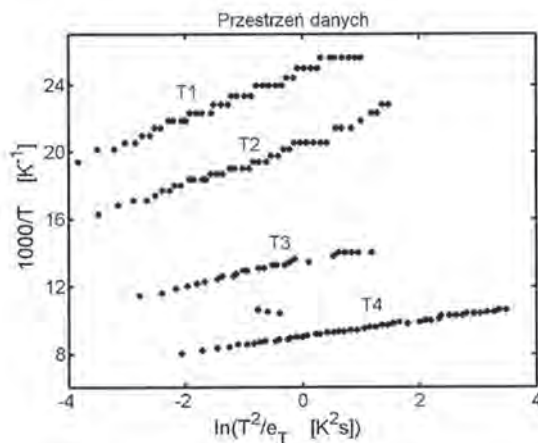
a współrzędne kartezjańskiej przestrzeni parametrów (a, b) wyrażą się jako:

$$a = \frac{10^3 k_B}{E_a} \quad b = \frac{10^3 k_B}{E_a} \ln(A) \quad (7)$$



Rys. 5. Eksperymentalna powierzchnia widmowa otrzymana za pomocą procedury korelacyjnej dla centrów radiacyjnych w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6) na podstawie relaksacyjnych przebiegów fotoprądu zmierzonych w zakresie temperatur 35 K – 140 K. Punktami zaznaczono grzbiety fałd związanych z termiczną emisją nośników ładunku z centrów defektowych T1, T2, T3 i T4.

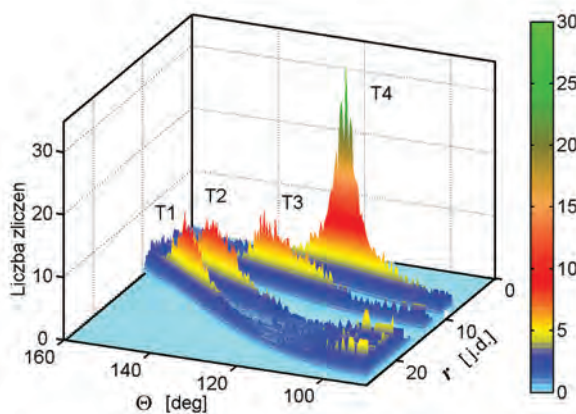
Fig. 5. Experimental spectral surface obtained by means of the correlation procedure from the photocurrent relaxation waveforms in the temperature range of 35-140 K for radiation centers in a FZ Si:Sn crystal (sample #8a6). The points mark ridgelines of the folds connected with thermal emission rate of charge carriers from defect centers T1, T2, T3 and T4.



Rys. 6. Przestrzeń danych do transformacji Hough'a otrzymana poprzez rzutowanie na płaszczyznę $[1000/T, \ln(T^2/e_T)]$ linii grzbietowych korelacyjnej powierzchni widmowej przedstawionej na Rys. 5 dla centrów radiacyjnych w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6).

Fig. 6. Space of data for Hough transformation obtained by projection of the ridgelines shown in the Fig. 5 for radiation centers in a FZ Si:Sn crystal (sample #8a6) on the plane $[1000/T, \ln(T^2/e_T)]$.

W celu wstępnej lokalizacji obszarów skupień punktów przecięć, obraz rzutów punktów linii grzbietowych z Rys. 6 poddano transformacji Hough'a i wyznaczono krzywe w przestrzeni (r, Θ) , zgodnie z procedurą przedstawioną w punkcie 2.1. Przestrzeń (r, Θ) podzielono na komórki o wymiarach $\Delta r = 0,1$ i $\Delta \Theta = 0,5^\circ$ i wyznaczono histogram przedstawiający liczby krzywych Hough'a przechodzących przez te komórki. Trójwymiarową wizualizację histogramu przedstawiono na Rys. 7. Histogram zawiera cztery wyraźne piki odpowiadające zbiorom liniowo rozłożonych punktów T1-T4 w przestrzeni $[1000/T, \ln(T^2/e_r)]$, pokazanym na Rys. 6. Można zauważyć, że najwyższy pik oznaczony etykietą T4 odpowiada zbiorowi punktów ułożonych z najmniejszym rozrzutem wzdłuż linii prostej.

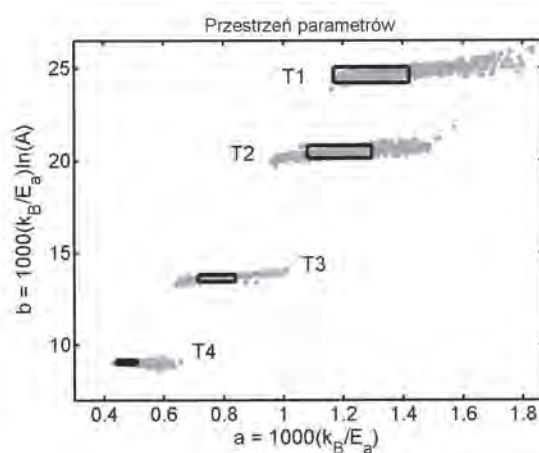


Rys. 7. Trójwymiarowa wizualizacja histogramu liczby krzywych Hough'a w przestrzeni (r, Θ) dla centrów radiacyjnych w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6). Wymiary komórki histogramu wynoszą $\Delta r = 0,1$ i $\Delta \Theta = 0,5^\circ$. Widoczne są cztery piki odpowiadające zbiorom liniowo rozłożonych punktów w przestrzeni $[1000/T, \ln(T^2/e_r)]$, pokazanym na Rys. 6.

Fig. 7. 3D visualization of the Hough curves histogram in the space (r, Θ) for radiation centers in a FZ Si:Sn crystal (sample #8a6). The bin dimensions are $\Delta r = 0,1$ i $\Delta \Theta = 0,5^\circ$. The four peaks correspond to the linear sets of points shown in Fig. 6 for defect centers in the space $[1000/T, \ln(T^2/e_r)]$.

Dla wszystkich par punktów z Rys. 6 obliczono wartości parametrów prostych przez nie przechodzących i utworzono przestrzeń parametrów w kartezjańskim układzie współrzędnych (a, b) wyrażonych poprzez energię aktywacji E_a i współczynnik A w równaniu Arrheniusa. Przestrzeń (a, b) pokazano na Rys. 8, w której skupiska punktów odpowiadają radiacyjnym centrom defektowym T1, T2, T3 i T4 w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6). Parametry centrów wyznaczono jako środki obszarów o największych zagęszczeniach punktów w skupiskach [9]. Poszukiwania tych środków

odbywają się przy zastosowaniu prostokątnych okien przesuwanych nad skupiskami (Rys. 8). Jako środek skupiska przyjmuje się współrzędne środka okna, dla którego średni kwadrat odległości wszystkich punktów objętych oknem od ich średniego położenia jest najmniejszy. Algorytm obliczeń składa się z dwóch etapów [9]. W etapie pierwszym następuje zgrubne zlokalizowanie położenia wszystkich pików histogramu przedstawionego na Rys. 7 oraz określenie wymiarów prostokątnych okien na podstawie szerokości tych pików, mierzonej na połowie ich wysokości (parametr FWHM). W etapie drugim następuje iteracyjne wyznaczenie optymalnych położenia kolejnych



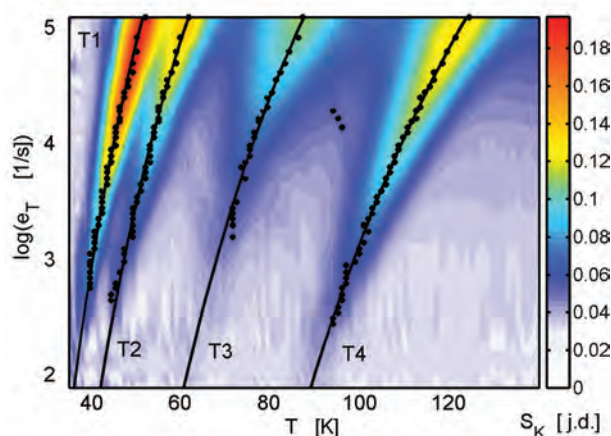
Rys. 8. Wyniki transformacji Hough'a przedstawione w kartezjańskim układzie współrzędnych (a,b) wyrażonych poprzez energię aktywacji E_a i współczynnik A w równaniu Arrheniusa dla przestrzeni danych (Rys. 6), odpowiadających radiacyjnym centrom defektowym T1, T2, T3 i T4 w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6). Prostokątami zaznaczono okna obejmujące obszary o maksymalnym skupieniu punktów. Położenie okna określa parametry E_a i A .

Fig. 8. Results of the Hough transformation presented in the Cartesian coordinates (a,b) given by the activation energy E_a and the coefficient A in the Arrhenius equation for the data space from the Fig. 6, corresponding to the radiation centers T1, T2, T3 and T4 in a FZ Si:Sn crystal (sample #8a6). Rectangles mark regions with the maximal convergence of points. The position of the rectangle determines the E_a and A parameters.

okien wskazujących obszary o największym skupieniu i obliczenie parametrów centrów defektowych. Jako punkty początkowe procesu optymalizacji przyjmuje się współrzędne odpowiadające położeniom maksimum histogramu (Rys. 7). Parametry k -tego centrum defektowego można obliczyć z zależności:

$$E_{ak} = 10^3 \frac{k_B}{a_k} \quad A_k = \exp\left(\frac{b_k}{a_k}\right) \quad (8)$$

gdzie a_k i b_k są wartościami średnimi parametrów punktów objętych oknem położonym nad obszarem o największym zagęszczeniu k -tego skupiska. Eksperymentalne prążki widmowe, otrzymane w wyniku dwuwymiarowej analizy relaksacyjnych przebiegów fotoprądu z wykorzystaniem procedury korelacyjnej, dla centrów radiacyjnych w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6) przedstawiono na Rys. 9. Punktami zaznaczono przebiegi grzbietów fałd odpowiadających centrom T1, T2, T3 i T4. Linie ciągłe ilustrują temperaturowe zależności szybkości emisji nośników ładunku, wyznaczone dla wartości parametrów centrów defektowych określonych na podstawie położenia okien (Rys. 8).



Rys. 9. Eksperymentalne prążki widmowe, otrzymane w wyniku dwuwymiarowej analizy relaksacyjnych przebiegów fotoprądu z wykorzystaniem procedury korelacyjnej, dla centrów radiacyjnych w kryształach FZ Si:Sn (próbka #8a6). Punktami zaznaczono przebiegi grzbietów fałd odpowiadających centrom T1, T2, T3 i T4. Linie ciągłe ilustrują temperaturowe zależności szybkości emisji nośników ładunku wyznaczone dla wartości parametrów centrów defektowych określonych na podstawie położenia okien (Rys. 8).

Fig. 9. Experimental spectral fringes obtained by the two-dimensional correlation procedure applied to the analysis of the photocurrent relaxation waveforms for radiation centers in a FZ Si:Sn crystal (sample #8a6). The points mark the ridgelines corresponding to the centers T1, T2, T3 and T4. The solid lines illustrate the temperature dependences of emission rate of charge carriers in accordance with the values of the defect center parameters determined from the position of the windows shown in Fig. 8.

Wyznaczone parametry centrów defektowych (E_a, A) mają odpowiednio wartości T1: (63 meV, $6,3 \cdot 10^7 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$); T2: (71 meV, $1,8 \cdot 10^7 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$); T3: (99 meV, $6,7 \cdot 10^7 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$) i T4: (173 meV, $7,07 \cdot 10^7 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$) [9]. Warto podkreślić, że przedstawione parametry centrów defektowych zostały otrzymane w sposób automatyczny, podczas tylko jednego przebiegu procedury analizującej. Porównując wyznaczone wartości parametrów z parametrami wzorcowymi [10] T1: (61 meV, $1,1 \cdot 10^8 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$); T2: (67 meV,

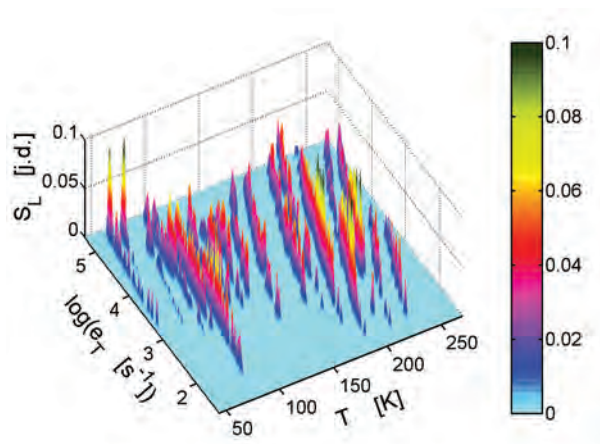
$1,4 \times 10^7 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$); T3: (100 meV, $6,7 \times 10^6 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$) i T4: (176 meV, $1,2 \times 10^8 \text{ K}^{-2}\text{s}^{-1}$) oraz otrzymanymi metodą odwrotnego przekształcenia Laplace'a [4] można stwierdzić ich dużą zbieżność ich wartości. Błąd względny wyznaczenia energii aktywacji, przyjęty jako unormowana różnica $\delta E_a = |E_{aH} - E_{aLW}| / E_{aLW}$, gdzie E_{aH} jest wartością wyznaczoną metodą Hough'a, a E_{aLW} oznacza energię aktywacji wyznaczoną metodą Laplace'a lub wzorcową, nie przekracza 9%.

3. ZASTOSOWANIE TRANSFORMACJI HOUGH'A DO ZOBRAZOWANIA TEMPERATUROWYCH ZALEŻNOŚCI SZYBKOŚCI EMISJI NOŚNIKÓW ŁADUNKU Z WZROSTOWYCH CENTRÓW DEFECTOWYCH W SI GaAs

Opracowany zmodyfikowany algorytm Hough'a wykorzystano do zobrazowania właściwości wzrostowych centrów defektowych w SI GaAs. Badanie właściwości centrów defektowych przeprowadzono dla kryształu SI GaAs otrzymanego metodą krystalizacji kierunkowej z wykorzystaniem pionowego przesuwu gradientu temperatury (próbka AXT_#1_89e_VGF). Rezystywność próbki w temperaturze 300 K wynosiła $8,8 \times 10^7 \Omega\text{cm}$. Wartość energii Fermiego określona na podstawie temperaturowej zmiany prądu ciemnego i ekstrapolowana do temperatury zera bezwzględnego, miała wartość 0,72 eV. Ruchliwość hallowska (300 K) wynosiła $5430 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ i gęstość dyslokacji była mniejsza od $5,0 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ [2].

Próbkę oświetlano impulsowo za pomocą diody elektroluminescencyjnej emitującej światło o długości fali $\sim 650 \text{ nm}$. Szerokość impulsów generujących nadmiarowe nośniki ładunku wynosiła 30 ms, zaś okres ich powtarzania równy był 80 ms. Strumień fotonów wynosił $\sim 4,2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Relaksacyjne przebiegi fotoprądu zarejestrowano po wyłączeniu oświetlenia próbki w zakresie temperatur 43 – 270 K z krokiem 1 K. Następnie na podstawie temperaturowych zmian stałych czasowych relaksacyjnych przebiegów fotoprądu wytworzono obraz prążków widmowych Laplace'a [2], którego trójwymiarową wizualizację zilustrowano na Rys. 10.

Ze względu na wyspowy charakter fałd widma przedstawionego na Rys. 10, zastosowanie aproksymacji neuronowej do wyznaczenia parametrów centrów defektowych nie było skuteczne. Natomiast mała szerokość prążków i ich regularne przebiegi o małym rozrzucie, układające się wzdłuż wyraźnie zarysowanych linii, umożliwiły zastosowanie algorytmu Hough'a do automatycznego wyznaczenia parametrów centrów defektowych. W tym celu, zgodnie z procedurą opisaną w pkt. 2, punkty maksimum przekrojów fałd widma dla $T = \text{const.}$ rzutowano na płaszczyznę o współrzędnych $x = 1000/T$ i $y = \ln(T^2/e_f)$, tworząc dwukolorowy obraz przebiegu linii grzbietowych fałd (przestrzeń danych). W celu zwiększenia czytelności, obraz punktów maksimum został podzielony na dwie części zawierające punkty maksimum

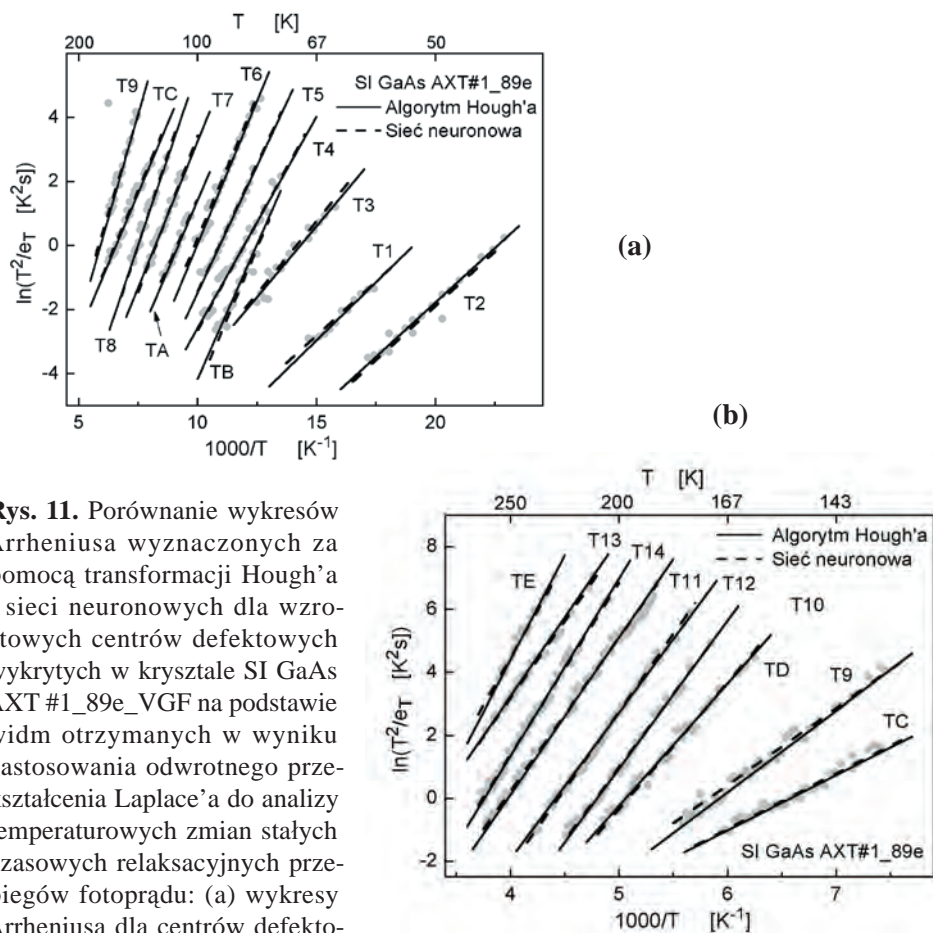


Rys. 10. Trójwymiarowa wizualizacja widma Laplace'a relaksacyjnych przebiegów fotoprądu dla kryształu SI GaAs (próbka AXT#1_89e_VGF) zarejestrowanych w zakresie temperatur 50 – 270 K.

Fig. 10. 3D visualization of the Laplace spectrum obtained from the experimental photocurrent relaxations recorded in the 50 – 270 K for a SI GaAs crystal (sample AXT#1_89e_VGF).

fałd obserwowanych w całości w zakresach temperatur 14 - 160 K i 130 - 270 K. Stosując transformację Hough'a, w obrazach rzutów punktów maksimum automatycznie wyodrębniono zbiory punktów układających się wzdłuż prostych i wyznaczono parametry tych prostych. Porównanie wykresów Arrheniusa wyznaczonych za pomocą transformacji Hough'a i sieci neuronowych dla wzrostowych centrów defektowych wykrytych w kryształach SI GaAs AXT #1_89e_VGF zilustrowano na Rys. 11a dla zakresu temperatur 14 - 160 K i Rys. 11b dla zakresu temperatur 130 - 270 K. Widoczne punkty ilustrują przebiegi linii grzbietowych poszczególnych fałd i stanowią przestrzeń danych dla transformacji Hough'a. Wykresy otrzymane za pomocą transformacji Hough'a oraz za pomocą sieci neuronowych zaznaczono odpowiednio liniami ciągłymi i liniami przerywanymi. Można zauważyć dobrą zbieżność przebiegów prostych wyznaczonych przy zastosowaniu obu algorytmów.

Parametry wszystkich centrów defektowych wykrytych w kryształach SI GaAs, wyznaczone na podstawie temperaturowych zależności szybkości emisji nośników ładunku przedstawionych na Rys. 11 zestawiono w Tab. 1. Dla porównania zamieszczono również wartości parametrów pułapek wyznaczone poprzez aproksymację neuronową [2], analizę jednowymiarowych widm korelacyjnych [10-11] oraz podano przypuszczalne konfiguracje atomowe defektów ustalone na podstawie informacji zawartych w posiadanej bazie wiedzy.



Rys. 11. Porównanie wykresów Arrheniusa wyznaczonych za pomocą transformacji Hough'a i sieci neuronowych dla wzrostowych centrów defektowych wykrytych w kryształach SI GaAs AXT #1_89e_VGF na podstawie widm otrzymanych w wyniku zastosowania odwrotnego przekształcenia Laplace'a do analizy temperaturowych zmian stałych czasowych relaksacyjnych przebiegów fotoprądu: (a) wykresy Arrheniusa dla centrów defektowych wykrytych w zakresie temperatur 45 - 160 K, (b) wykresy Arrheniusa dla centrów defektowych wykrytych w zakresie temperatur 130 - 270 K. Wykresy otrzymane za pomocą transformacji Hough'a oraz za pomocą sieci neuronowych zaznaczono odpowiednio liniami ciągłymi i liniami przerywanymi. Widoczne punkty ilustrują przebiegi linii grzbietowych poszczególnych fałd i stanowią przestrzeń danych dla transformacji Hough'a.

Fig. 11. Comparison of the Arrhenius plots obtained by the Hough transformation and neural networks algorithms for the grown-in defect centres detected in a SI GaAs crystal (sample AXT+#1_89e_VGF) in the spectra obtained as a result of using the inverse Laplace transformation to the analysis of the photocurrent relaxation waveforms: (a) plots for the defect centres detected in the temperature range of 45 - 160 K, (b) plots for the defect centres detected in the temperature range of 130 - 270 K. The plots received by using the Hough transformation and neural networks procedure are marked with solid and dashed lines, respectively. The points illustrate the ridgelines of the folds and represent the data space for the Hough transformation.

Tabela 1. Wartości parametrów centrów defektowych w próbce kryształu SI GaAs wyznaczone metodą niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej z zastosowaniem metody Hough'a do analizy dwuwymiarowych widm Laplace'a. Dla porównania zamieszczono również parametry pułapek wyznaczone poprzez aproksymację neuronową [2], analizę jednowymiarowych widm korelacyjnych [10-11] oraz identyfikację pułapek przeprowadzoną na podstawie danych literaturowych.

Table 1. Summary of the parameters of defect centres in SI GaAs determined by means of the PITS technique with implementation of the Hough method to the analysis of the two-dimensional Laplace spectrum. For comparison the parameters of traps determined by the neural approximations [2] and the analysis of the one-dimensional correlation spectra [10-11] are given. A tentative identification of the defect centres was made using the reference data.

SI GaAs (próbka AXT_#1_89e_VGF)							
Symbol pułapki	Wyniki otrzymane z zastosowaniem procedury analizy obrazu (Hough'a)		Wyniki otrzymane z zastosowaniem procedury neuronowej i bezpośredniego dopasowania [2]		Wyniki otrzymane poprzez analizę jednowymiarowych widm korelacyjnych [10,11]		Identyfikacja
	E_{aH} [meV]	A_H [$K^{-2}s^{-1}$]	E_{aN} [meV]	A_N [$K^{-2}s^{-1}$]	E_{aC} [meV]	A_C [$K^{-2}s^{-1}$]	
T1	62	$9,9 \times 10^5$	56	$2,4 \times 10^5$	50	$5,7 \times 10^4$	P6, V_{As}^{-0} [11] e^*
T2	59	$4,7 \times 10^6$	59	$5,1 \times 10^6$	50	-	V_{Ga} [16] e
T3	76	$3,1 \times 10^5$	78	$3,6 \times 10^5$	80	$5,1 \times 10^4$	P7, $Ga_{As}^{0/-}$ [11,17] h
T4	114	$7,3 \times 10^6$	117	$1,1 \times 10^7$	90	$1,7 \times 10^6$	S1, $B_{As}^{0/-}$ [10] h
T5	137	$3,5 \times 10^7$	138	$3,6 \times 10^7$	140	$6,8 \times 10^7$	P9, $V_{As}^{0/+}$ [10,11] e
TA	150	$8,7 \times 10^6$	146	$5,5 \times 10^6$	130	$6,0 \times 10^6$	P10, $Cu^{0/-}$ [11,15] h
TB	145	$1,3 \times 10^9$	151	$3,4 \times 10^9$	156	-	$Co^{0/-}$ [18] h (?)
TC	152	$1,1 \times 10^5$	152	$1,0 \times 10^5$	140	$2,3 \times 10^5$	EA7 [12] e
T6	154	$5,4 \times 10^7$	153	$3,9 \times 10^7$	150	$1,3 \times 10^8$	EL15 [13] e
T7	158	$3,5 \times 10^6$	168	$9,6 \times 10^6$	170	$2,1 \times 10^6$	EL11 [10,11] e
T8	189	$1,4 \times 10^7$	196	$2,5 \times 10^7$	180	$1,7 \times 10^8$	P12, $B_{As}^{-2/-}$ [10,11] h
T9	224	$4,9 \times 10^6$	211	$1,5 \times 10^6$	220	$2,8 \times 10^6$	EL14, $V_{Ga}^- - V_{As}^-$ [10,13] e
TD	334	$3,3 \times 10^8$	346	$7,4 \times 10^8$	350	$6,8 \times 10^8$	EL6, $As_{Ga}^- - V_{As}^-$ [10,11] e
T10	405	$6,2 \times 10^9$	400	$4,4 \times 10^9$	400	$3,7 \times 10^8$	HB5 [14] h
T11	430	$4,1 \times 10^8$	420	$2,3 \times 10^8$	420	$2,1 \times 10^8$	EL5, $As_{Ga}^- - V_{Ga}^-$ [10,11] e
T12	401	$8,2 \times 10^8$	423	$2,8 \times 10^9$	430	$8,5 \times 10^9$	P18, $Cu^{-2/-}$ [11,15] h
T13	433	$2,1 \times 10^7$	421	$1,2 \times 10^7$	410	$5,9 \times 10^7$	EB6 [13] e
T14	487	$1,7 \times 10^9$	471	$7,4 \times 10^8$	480	$6,0 \times 10^7$	EB5 [12,13] e
TE	573	$4,3 \times 10^9$	521	$3,6 \times 10^8$	520	$5,1 \times 10^8$	P21, $V_{Ga}^{2-/3-}$ [10,11] h

*) – e lub h oznaczają odpowiednio pułapki elektronowe lub dziurowe.

W procesie identyfikacji przyjęto, że energia aktywacji centrów odniesienia może różnić się od wartości wyznaczonych eksperymentalnie o $\sim 20\%$, a wartość współczynnika A może różnić się nie więcej niż o rząd wielkości. Szczegółowa dyskusja danych literaturowych została przedstawiona w pracy [2].

Do oceny rozbieżności wartości parametrów centrów defektowych, wyznaczonych metodami Hough'a i aproksymacji neuronowej, przyjęto jako wskaźnik dla energii aktywacji - unormowaną średnią różnicę $\delta E_a = |E_{aH} - E_{aN}| / E_{aN}$, gdzie E_{aH} i E_{aN} oznaczają wartości energii aktywacji wyznaczone odpowiednio metodą transformacji Hough'a i metodą aproksymacji neuronowej. Dla współczynnika przedeksponencjalnego przyjęto iloraz wartości parametru A_H wyznaczonej za pomocą transformacji Hough'a do wartości parametru A_N wyznaczonej za pomocą aproksymacji neuronowej, jako $\delta A = A_H / A_N$. Wartości średnie przyjętych miar dla otrzymanego automatycznie zbioru parametrów za pomocą transformacji Hough'a wynoszą odpowiednio $\overline{\delta E_a} = 3,7 \times 10^{-2}$ i $\overline{\delta A} = 1,9$. Maksymalna różnica w wartościach energii aktywacji występuje dla centrów defektowych T1 i wynosi $\delta E_{aT1} = 10,7 \times 10^{-2}$, natomiast wartość maksymalna miary rozbieżności współczynnika A występuje dla centrów defektowych TE i wynosi $\delta A_{TE} = 11,9$, czyli więcej niż o rząd wielkości. Pokazane na Rys. 11b wykresy obu prostych dla centrów defektowych TE nie różnią się znacząco, co wynika z dużego ich nachylenia. Różnica wartości parametru A dla innych centrów defektowych jest znacznie mniejsza. Przykładowo, dla bardziej widocznej rozbieżności przebiegu prostych Arrheniusa dla centrów defektowych T9, wartość miary rozbieżności współczynnika A wynosi $\delta A_{T9} = 3,26$, czyli czterokrotnie mniej niż dla centrów TE. Warto zwrócić uwagę, że różnice w wartościach parametrów wyznaczonych obiema metodami nie przekraczają przedziałów przyjętych w procesie identyfikacji centrów defektowych

Warto podkreślić, że większość prostych pokazanych na Rys. 11a i Rys. 11b została wyznaczona podczas pojedynczych procesów obliczeniowych. Nie zostały wykryte proste związane z centrami defektowymi T1 i TB ze względu na małą liczbę zbiorów tych punktów, nie tworzących wyraźnych skupień w przestrzeni parametrów. Występuje wówczas trudność z wykryciem takiego zbioru i określenia jego środka ciężkości przez istniejący algorytm. Dodatkowo, punkty związane z centrami defektowymi T11 i T14 zostały zaklasyfikowane do jednego zbioru. Powodem tego była zbyt mała rozdzielczość procedury lokalizującej położenia pików w histogramie, która nie pozwoliła na rozróżnienie blisko położonych i rozmytych pików odpowiadających tym centrom defektowym. W obu wymienionych przypadkach parametry prostej aproksymującej określone były poprzez zastosowanie transformacji Hough'a do ręcznie wyodrębnionego zbioru punktów.

4. PODSUMOWANIE

Po raz pierwszy został zastosowany algorytm rozpoznawania wzorców do wyznaczania parametrów centrów defektowych w niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej PITS. Wykorzystana została transformacja Hough'a opracowana do poszukiwania odcinków linii prostych w obrazie dwukolorowym. W PITS obraz taki jest tworzony poprzez rzutowanie punktów wyznaczających przebiegi linii grzbietowych dwuwymiarowych widm korelacyjnych i Laplace'a na płaszczyznę wyznaczoną osiami: $\ln(T^2/e_p)$ i $1000/T$. Obiektami poszukiwanymi są linie proste, wzdłuż których układają się rzuty punktów linii grzbietowych. Linie te opisywane są równaniem Arrheniusa i stanowią sygnatury rodzajów centrów defektowych. Parametry centrów defektowych obliczane są bezpośrednio na podstawie położenia wyznaczonych prostych. Dużą zaletą transformacji Hough'a jest możliwość wykrywania wielu prostych równocześnie, uzyskiwana przez niezależną analizę położenia każdego punktu. Opracowaną procedurę zastosowano do badania centrów defektowych w kryształach półprzewodzącego (SI) GaAs VGF. Wyznaczone wartości parametrów wykazują dużą zbieżność z wartościami otrzymanymi metodą aproksymacji neuronowej fałd w dwuwymiarowych widmach Laplace'a oraz z wartościami wyznaczonymi poprzez analizę jednowymiarowych widm korelacyjnych. Należy wziąć pod uwagę, że procedura wykorzystująca transformację Hough'a analizuje automatycznie położenia wszystkich punktów rzutów linii grzbietowych, natomiast procedura neuronowa oblicza parametry rodzaju centrów defektowych z manualnie wybranego fragmentu fałdy o najlepszej czytelności. Należy zatem oczekiwać, że parametry otrzymane metodą aproksymacji neuronowej będą dokładniejsze niż otrzymane za pomocą transformacji Hough'a. Wyniki otrzymywane przy pomocy aktualnie istniejącego oprogramowania wykorzystującego transformację Hough'a mogą znaleźć zastosowanie do analiz wstępnych w celu stwierdzenia, które centra defektowe o takich samych lub zbliżonych wartościach parametrów były już obserwowane i czy jest zidentyfikowana ich konfiguracja atomowa. Dalsze prace należy prowadzić nad problemem zwiększenia rozdzielczości procedury analizującej położenia pików w histogramie oraz efektywności procedury wyznaczającej środki skupień punktów przecięć w przestrzeni parametrów. Osiągnięte rezultaty będą wykorzystane przy opracowywaniu nowych procedur obliczeniowych, zwiększających efektywność inteligentnego systemu do badania centrów defektowych w kryształach materiałów wysokorezystywnych.

LITERATURA

- [1] Pawłowski M., Kamiński P., Jankowski St., Kozłowski R., Wierzbowski M., Miczuga M.: Inteligentny system pomiarowy do badania centrów defektowych w materiałach

półizolujących. Sprawozdanie końcowe z wykonania projektu badawczego KBN nr 4 T10C 033 22, KBN-ITME 2004

- [2] Pawłowski M., Kamiński P., Kozłowski R., Kozubal M., Żelazko J.: Obrazowanie właściwości centrów defektowych w kryształach półizolującego GaAs z zastosowaniem odwrotnego przekształcenia Laplace'a do analizy relaksacyjnych przebiegów fotoprądu. *Materiały Elektroniczne*, 34, 1/2, 2006, 48-77
- [3] Provencher S.: A constrained regularization method for inverting data represented by linear algebraic and integral equations. *Comp. Phys. Comm.*, 27, 1982, 213-228
- [4] Pawłowski M., Kamiński P., Kozłowski R., Miczuga M.: Laplace transform photo-induced transient spectroscopy: New powerful tool for defect characterisation in semi-insulating. *Materials, Proceedings SPIE, Crystalline Materials for Optoelectronics*, 5136, 2003, 59-65
- [5] Pawłowski M., Kamiński P., Kozłowski R.: Opracowanie procedury analizy niestacjonarnych przebiegów fotoprądu wykorzystującej algorytm przekształcenia Laplace'a. Sprawozdanie z pracy badawczo-rozwojowej, ITME, 2003
- [6] Pawłowski M.: Extraction of deep trap parameters from photocurrent transients by two dimensional spectral analysis. *Solid-State Electron.*, 46, 2002, 1879-1885
- [7] Jankowski S., Wierzbowski M., Kamiński P., Pawłowski M.: Implementation of neural network method to investigation of defect centers in semi-insulating materials. *International Journal of Modern Physics B*, 16, 28-29, 2002, 4449-4454
- [8] Żorski W.: Metody segmentacji obrazów oparte na transformacie Hough'a. Instytut Automatyki i Robotyki, Wydział Cybernetyki WAT, Warszawa, 2000
- [9] Chachuła W.: Komputerowy program do analizy widm relaksacji fotoprzewodnictwa mierzonych metodą niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej. Praca dyplomowa magisterska, kierownik pracy: dr inż. M. Pawłowski, Wojskowa Akademia Techniczna, 2005
- [10] Kozłowski R.: Niestacjonarna spektroskopia fotoprądowa o dużej rozdzielczości jako nowa metoda badania centrów defektowych w półprzewodnikach wysokorezystywnych. Rozprawa doktorska, ITME 2001
- [11] Kamiński P., Kozłowski R.: High-resolution photoinduced transient spectroscopy as a new tool for quality assessment of semi-insulating GaAs. *Mater. Sci. Eng.*, B. 91-92, 2002, 398-402
- [12] Bourgoin C., von Bardeleben H. J., Stiévenard D.: Native defects in gallium arsenide. *J. Appl. Phys.*, 64, 1988, R65-R91
- [13] Martin G. M., Mitonneau A., Mircea A.: Electron traps in bulk and epitaxial GaAs crystals. *Electron. Lett.*, 13, 7, 1977, 191-193
- [14] Martin G. M., Mitonneau A., Mircea A.: Hole traps in bulk and epitaxial GaAs crystals. *Electron. Lett.*, 13, 22, 1977, 666-668
- [15] Kullendorff N., Jansson L., Ledebø L. A.: Copper-related deep level defects in III-V semiconductors. *J. Appl. Phys.*, 54, 6, 1983, 3203-3212

M. Pawłowski

- [16] El Achheb Z., Hourmatallaha A., Barnoussi M., Benzakour N., Jorio A.: Theoretical investigation of the level energies for ideal Ga and As vacancies in GaAs. *J. Condensed Matter.*, 5, 1, 2004, 28-34
- [17] Bugajski M., Ko K. H., Lagowski J., Gatos H. C.: Native acceptor levels in Ga-rich GaAs. *J. Appl. Phys.*, 65, 1988, 2, 596-599
- [18] Hennel A. M.: Energy levels due to cobalt in GaAs. EMIS Datareview RN-16313. October 1989

SUMMARY

IMPLEMENTATION OF THE HOUGH TRANSFORMATION TO THE ANALYSIS OF TWO-DIMENSIONAL PITS SPECTRA

Photoinduced transient spectroscopy (PITS) with the implementation of the pattern recognition procedure has been employed to studying defect centres in high-resistivity materials. The thermal emission of charge carriers from defect centres manifests itself in the PITS spectral surface by the folds, the ridgelines of which are described with the Arrhenius equation. For determination of the parameters of defect centres by approximation of the ridgelines of the folds with Arrhenius equation, the Hough transformation has been proposed. The new method is applied to characterisation of defect centres in semi-insulating GaAs grown by the vertical gradient freeze (VGF) technique. The image obtained by means of the Hough transformation illustrating the temperature dependences of the emission rate for detected centers is compared with that received using the approximation procedure employing the neural network.