

Warszawa, 29.01.2020

Prof. dr hab. Tadeusz Wosiński  
Instytut Fizyki PAN, Warszawa

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Żelazko pt.:

„Zastosowanie przekształcenia Laplace’a do wyznaczania parametrów radiacyjnych centrów defektowych w monokryształach krzemu metodą niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Żelazko jest pracą eksperymentalną, poświęconą badaniom głębokich centrów defektowych, generowanych w procesach napromieniowania wysokoenergetycznymi protonami, w monokryształach krzemu o wysokiej czystości. Badania prowadzono przy użyciu techniki pomiarowej niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej PITS (od skrótu nazwy angielskiej Photo-Induced Transient Spectroscopy). Do pomiarów doktorant wykorzystał wysoko-rozdzielczą modyfikację tej techniki, wykorzystującą transformatę Laplace’a do analizy niestacjonarnych przebiegów fotoprądu, opracowaną wcześniej w Instytucie Fizyki PAN przez prof. Leszka Dobaczewskiego do analizy niestacjonarnych przebiegów pojemnościowych w technice pomiarowej DLTS. Modyfikacja ta pozwala na zasadnicze zwiększenie zdolności rozdzielczej między poziomami o bliskim położeniu energetycznym w przerwie wzbronionej półprzewodnika. Okazała się ona szczególnie przydatna do śledzenia zmian właściwości oraz koncentracji generowanych defektów, wywołanych zmianą dawki napromieniowania.

Tematyka rozprawy jest ważna ze względu na rozwój techniki pomiarowej dla badań głębokich centrów defektowych w materiałach wysokorezystywnych, ma także znaczenie dla technologii detektorów cząstek o wysokiej energii opartych na krzemie, wykorzystywanych m.in. w CERN. Praca wykonana została w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie. Badania prowadzone były częściowo w ramach projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Rozprawa liczy 172 strony, zawiera ponad 70 rysunków i wykresów oraz 13 tabel prezentujących zbiorcze zestawienia parametrów badanych centrów defektowych oraz parametrów sterujących procesem obliczeniowym widm Laplace’a. Jest ona podzielona na 9 rozdziałów, poprzedzonych krótkim

streszczeniem w języku polskim i angielskim, i zakończona jest obszerną bibliografią obejmującą 145 pozycji oraz spisem oznaczeń. We Wprowadzeniu autor zdefiniował cele naukowe przeprowadzonych badań i przedstawił stosowane narzędzia badawcze oraz układ rozprawy. W rozdziałach 2 i 3 przedstawił podstawowe informacje dotyczące mechanizmów powstawania defektów radiacyjnych w monokryształach krzemu oraz ich właściwości, a także najważniejsze metody badań tych defektów. W rozdziale 4 autor szeroko omówił przekształcenie Laplace'a w zastosowaniu do analizy przebiegów relaksacyjnych w pomiarach technikami DLTS oraz PITS. W krótkim rozdziale 5 podsumował podstawowe tezy rozprawy doktorskiej. W rozdziałach 6 i 7 doktorant szczegółowo omówił opracowaną przez siebie procedurę numeryczną sterującą procesem obliczeniowym analizy relaksacyjnych przebiegów fotoprądu otrzymanych techniką PITS oraz metodę wyznaczania koncentracji radiacyjnych centrów defektowych na podstawie intensywności uzyskanych prążków widmowych Laplace'a. Rozdział 8 przedstawia uzyskane przez autora – techniką PITS z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a – wyniki eksperymentalne właściwości i koncentracji radiacyjnych centrów defektowych w kryształach krzemu poddanych napromieniowaniu czterema różnymi dawkami protonów o energii 23 MeV. Rozdział 9 przedstawia zwięzłe podsumowanie rozprawy oraz wykaz publikacji i prezentacji konferencyjnych i seminaryjnych autora, zawierających częściowe wyniki uzyskane w ramach pracy doktorskiej. Na podstawie tego wykazu można wnioskować, że badaniami techniką niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a doktorant zajmował się już w roku 2006 a zastosowaniem tej techniki do badań radiacyjnych centrów defektowych w krzemie – od roku 2010.

Bardzo ważną częścią rozprawy doktorskiej jest opracowanie – rozwijanej przez wiele lat w zespole doktoranta – techniki pomiarowej wysoko-rozdzielczej niestacjonarnej spektroskopii fotoprądowej z wykorzystaniem przekształcenia Laplace'a. W szczególności, opracowana przez doktoranta procedura numeryczna umożliwiła znaczącą poprawę rozdzielczości i pozwoliła na rozseparowanie prążków widmowych od centrów defektowych o zbliżonych wartościach szybkości emisji nośników ładunku. Pozwoliła ona również na wyznaczenie koncentracji poszczególnych centrów i zmian tych koncentracji wywołanych różnymi dawkami napromieniowania.

Do najważniejszych wyników naukowych rozprawy należy określenie sygnatur, tzn. wartości energii aktywacji szybkości emisji termicznej nośników z poziomu defektowego oraz przekroju czynnego na wychwyt nośników ładunku, 26-ciu głębokich poziomów centrów defektowych oraz wyznaczenie koncentracji tych centrów dla czterech różnych dawek napromieniowania kryształów krzemu. Duże wrażenie robi zakończone sukcesem rozseparowanie

tak dużej liczby głębokich poziomów defektowych o często bardzo zbliżonych sygnaturach. Wykorzystując bardzo obszerne dane literaturowe, a także dodatkowe pomiary metodami fotoluminescencji oraz fourierowskiej absorpcji optycznej w podczerwieni, wykonane na tych samych napromieniowanych kryształach krzemu, autorowi udało się zaproponować identyfikację defektów odpowiedzialnych za wszystkie 26 głębokie poziomy. Niektórym defektom autor przypisał kilka poziomów odpowiadających różnym stanom ładunkowym tego samego defektu.

Sześć głębokich poziomów autor przypisał różnym rodzajom termodonorów, dla których nie zdefiniował struktury atomowej defektu ani jego stanu ładunkowego. Dwa poziomy związał z agregatami trzech oraz czterech międzywęzłowych atomów krzemu. Cztery poziomy związane zostały z międzywęzłowymi oraz podstawieniowymi atomami resztkowej domieszki węgla. Pięć poziomów zostało związanych z kompleksami luk krzemowych z resztkowymi atomami tlenu (cztery defekty w tym jeden w dwóch stanach ładunkowych). Największą liczbę, bo aż dziewięć poziomów autor związał z agregatami dwóch, trzech, czterech oraz pięciu luk krzemowych w różnych stanach ładunkowych. Nie wszystkie argumenty za związaniem poszczególnych poziomów z określonymi konfiguracjami defektowymi są jednak w pełni przekonujące. Na rysunkach 57, 58 i 59 autor porównuje wykresy Arrheniusa uzyskane dla 12 głębokich poziomów z danymi literaturowymi otrzymanymi metodą DLTS. Widać tu jednak pewne nieścisłości. Wykresy dla poziomów T12B (Rys. 57) oraz T12A (Rys. 58) różnią się znacznie od tych podanych wcześniej na Rys. 54(b). Niemniej jednak, praca dostarcza bardzo bogatych informacji na temat defektów radiacyjnych w krzemie i stanowi ważny przyczynek do ich pełnej identyfikacji.

Redakcja rozprawy jest przejrzysta i starannie opracowana pod względem graficznym. Napisana jest poprawnym stylistycznie i zrozumiałym językiem. Zastrzeżenia budzi stosowanie notacji liczbowej typu  $1E14$  naprzemiennie z notacją typu  $1 \times 10^{14}$ , zarówno w tekście jak i na rysunkach i w tabelach. Ten drugi zapis jest prawidłowy i bardziej czytelny.

Z recenzenckiego obowiązku podaję poniżej zauważone błędy edytorskie i nieścisłości:

– Str. 34: we wzorze (16) występuje niezdefiniowany symbol  $A$  oznaczający, jak się można domyśleć, powierzchnię złącza. Ale symbolem  $A$  oznaczono wcześniej współczynnik przedeksponencjalny w równaniu Arrheniusa (wzór (14) oraz Spis oznaczeń na str. 168).

– Na str. 45 błędnie zdefiniowano magneton Bohra:  $\mu_B = qh/2\pi m_e$ . Powinno być:  $\mu_B = q\hbar/2m_e$  lub  $\mu_B = qh/4\pi m_e$ .

- Str. 51, powinno być:  $t_2/t_1 = 3$ , zamiast  $t_1/t_2 = 3$ , zgodnie z zależnością (13) na str. 33.
- Str. 56 i 57: prążki widmowe oznaczone w Tabeli 2, na Rys. 15 oraz w tekście symbolami T1 – T8, na Rys. 14 oznaczone są innymi symbolami: TX2, TS5, ...
- Str. 77, wiersz 9: w opisie wyników przedstawionych na Rys. 22 podano inną wartość parametru  $A$  niż na Rys. 22(a). Podobnie, inne wartości parametru  $A$  podane są na Rys. 26(a) i 26(c) niż w opisie na str. 81/82.
- Str. 81, wiersz 1, powinno być: Rys. 26(d) zamiast 24(d).
- Str. 82, wiersz 3 od dołu, powinno być: Rys. 27(a) zamiast 25(a).
- Str. 113: tłumaczenie przyczyn występowania dwóch maksimów obserwowanych w zależności  $\mu\tau(T)$  (Rys. 51) jest nieprzekonujące.
- Str. 119: parametry centrów defektowych wyznaczone z wykresów Arrheniusa przedstawiono w Tabeli 12 a nie w Tabeli 11, jak podano 4 razy na str. 119.

Podsumowując uważam, że autor zrealizował zamierzone cele pracy przyczyniając się do lepszego zrozumienia procesów powstawania defektów radiacyjnych w krzemie. Pokazał jednocześnie przydatność techniki niestacjonarnej spektroskopii pojemnościowej do badania elektronowych właściwości defektów radiacyjnych w krzemie i wydatnie przyczynił się do rozwoju jej wysoko-rozdzielczej modyfikacji. Ponadto doktorant wykazał, zarówno doskonałe opanowanie stosowanych technik eksperymentalnych jak i głębokie zrozumienie badanych zjawisk fizycznych. Na szczególne uznanie zasługuje staranność, z jaką wykonane zostały pomiary i dogłębna analiza danych doświadczalnych.

Stwierdzam, że recenzowana praca – mimo przedstawionych powyżej mankamentów – spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Jarosława Żelazko do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Thump