

Warszawa, 17 lipca 2023

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej

Mgr. inż. Kingi Majkowycz

zatytułowanej:

**„Badanie poziomów defektowych w fotodiodach z heterostruktur HgCdTe
stosowanych do detekcji promieniowania podczerwonego”**

**Na podstawie pisma Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej im.
Jarosława Dąbrowskiego**

Praca doktorska Pani mgr. inż. Kingi Majkowycz wykonana została w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT Warszawa). Promotorem rozprawy jest pplk. dr hab. inż. Małgorzata Kopytko, prof. WAT, a promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Murawski. Przewód doktorski wszczęto w trybie eksternistycznym i jest procedowany według Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawa o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023 poz. 742 z późn.zm.).

Wstęp

Struktury kwantowe wykorzystujące tellurek kadmowo rtęciowy (HgCdTe) są nadal podstawowym materiałem wykorzystywanym przy konstrukcji wysokotemperaturowych detektorów z wybranych zakresów podczerwieni (bliskiej, średniej i dalekiej, w zależności od składu molowego Cd w HgCdTe). Tego typu struktury wytwarzane są od wielu lat w wspólnym laboratorium uczelni WAT i firmy Vigo i należą do najlepszych dostępnych na rynku światowym.

Złożony doktorat dotyczy badania defektów występujących w fotodiodach na bazie HgCdTe, czyli dotyczy kluczowego zagadnienia wpływającego na wydajność odpowiednich

detektorów podczerwieni. Tym samym jest to bardzo istotna praca doktorska mająca na celu poprawę parametrów pracy odpowiednich struktur detekcyjnych. **Praca zawiera wiele ważnych i oryginalnych wyników, potwierdza dużą wiedzę teoretyczną kandydatki dotyczącą przedmiotu badań, ale co najważniejsze (podstawa mojego wniosku o wyróżnienie tej rozprawy) zawiera bardzo oryginalne rozwiązanie problemu profilowania rozkładu defektów w wielowarstwowych strukturach trzech typów detektorów pracujących w podczerwieni.** Profilowanie takiego rozkładu jest trudne i zwykle obarczone jest ograniczeniami stosowanych metod pomiarowych. Można to na przykład robić wykorzystując profilowanie sygnału katodoluminescencyjnego (CL) – pomiar widm CL dla różnych napięć przyspieszających elektrony. Rozdzielczość tej metody jest jednak limitowana.

Zaprezentowana w doktoracie metoda badawcza jest oryginalna i umożliwiła przypisania poziomów defektowych (w tym związanych z powierzchnią) do konkretnej warstwy w badanych trzech typach fotodiod. Analiza defektów oparta jest o pomiary DLTS (spektroskopia głębokich poziomów pułpkowych) i fotoluminescencji.

Konstrukcja pracy doktorskiej

Złożona rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów i obszernego spisu literatury. W rozdziale pierwszym („Wstęp”) autorka przedstawia problem badawczy do rozwiązania i cel końcowy prac prowadzonych w wielu laboratoriach na świecie – wytworzenie detektorów na bazie HgCdTe pracujących w temperaturze pokojowej. Aby to osiągnąć kluczowe jest obniżenie poziomu domieszkowania (domieszkowania nieintencjonalnego) poniżej 10^{15} cm^{-3} . Tym samym kluczowe jest zrozumienie natury poziomów defektowych w HgCdTe i ich rozkładu w wielowarstwowych strukturach stosowanych w odpowiednich fotodiodach.

W doktoracie autorka zaproponowała bardzo oryginalne podejście badawcze polegające na podziale badanych fotodiod na pojedyncze złącza p-n, każde z nich badane z wykorzystaniem dwóch uzupełniających się metod pomiarowych – DLTS i fotoluminescencja. Kroki prowadzące do realizacji tego zadania opisane są na stronie 15 rozprawy.

W rozdziale drugim autorka przedstawia podstawowe informacje o materiale wykorzystywanym do konstrukcji odpowiednich fotodiod (HgCdTe), informacje o

konstrukcji samych detektorów, w tym szczegółową analizę tzw. wykrywalności promieniowania podczerwonego, a następnie opis procesów generacyjno-rekombinacyjnych występujących w badanych strukturach, zarówno procesów radiacyjnych jak i nieradiacyjnych (procesy Augera). Opisany jest także proces zaproponowany przez Shockley'a, Reada i Halla związany z występowaniem poziomów defektowych (głównie głębokich stanów pułpkowych) w przerwie wzbronionej badanego materiału. W końcowej części tego rozdziału autorka analizuje badany materiał, w szczególności zależność jego przerwy energetycznej od składu molowego Cd w HgCdTe.

W rozdziale trzecim autorka omawia defekty występujące w sieci HgCdTe. Omawiając defekty sieci autorka wymienia luki, czasami nazywając je wakansami. Wolę te pierwsze określenie. Oprócz defektów punktowych omówione są także defekty liniowe – dyslokacje. Jako przyczynę występowania wielu z omówionych defektów wymienia się brak dopasowanego sieciowego do zastosowanego podłoża, jak i temperaturę w której prowadzony jest proces osadzania odpowiednich warstw. W czasie wzrostu warstw wytwarzane mogą być także tzw. defekty wzrostu typu mikro-bliźniaki czy tzw. „hilloki”. Z przyczyn oczywistych największym defektem każdej struktury jest jej powierzchnia.

Wszystkie wymienione powyżej defekty mogą niekorzystnie wpływać na efektywność detekcji światła przez fotoogniwo. Tym samym zrozumienie ich natury, określenie położenia w przerwie energetycznej, określenie wydajności pułpkowania nośników jest kluczowe. W tym celu w końcowej części rozdziału trzeciego autorka rozprawy omawia wpływ wymienianych defektów (zarówno głębokich jak i płytkich) na procesy pułpkowania nośników i na prąd w fotodiodzie. Rozwiązane są odpowiednie równania kinetyczne umożliwiające określenie tego wpływu.

Odpowiednie badania stanów defektowych są kluczowe dla optymalizacji prac fotoogniw. To podkreśla duże znaczenie praktyczne zawartych w rozprawie wyników badań.

Rozdział czwarty poświęcony jest omówieniu stosowanych metod pomiarowych – DLTSu i fotoluminescencji. Do tej części rozprawy mam jedną uwagę krytyczną. Na stronie 58 autorka omawia możliwe procesy rekombinacyjne obserwowane w pomiarach fotoluminescencji. Wymienia między innymi procesy rekombinacji ekscytonów związanych – ekscytonów

związanych na neutralnych donorach i akceptorach, ale także na zjonizowanych tych domieszkach. Te ostatnie ekscytony nie występują w większości z materiałów półprzewodnikowych – ekscyton związany na zjonizowanych donorach występuje dla nielicznych materiałów (na przykład w CdS). Obserwowanych jest dla materiałów o odpowiednim stosunku mas efektywnych elektronów do dziur. Natomiast ekscyton związany na zjonizowanym akceptorze nie jest obserwowany w materiałach półprzewodnikowych.

W tej części pracy bardzo ciekawa jest analiza kształtu widm fotoluminescencji. Jej omówienie potwierdza bardzo głębokie zrozumienie przez doktorantkę procesów rekombinacji promienistej.

Rozdział piąty zawiera omówienie wyników pomiarów DLTS dla trzech typów fotoogniw – na zakres spektralny bliskiej średniej i dalszej podczerwieni. W tej części rozprawy autorka mistrzowsko wykorzystuje pomysł jak można profilować defekty występujące w skomplikowanej wielowarstwowej strukturze fotoogniw. Dla każdego z trzech typów fotoogniw przygotowano po trzy „podstruktury” (odpowiednią architekturę „podstruktur” pomiarowych pokazano na przykład na stronie 65 rozprawy). **Takie podejście pozwoliło na profilowanie rozkładu defektów w pełnej strukturze fotoogniwa. Jest to najważniejszy wynik przedstawionej rozprawy.**

Dla każdej z badanych architektur heterostruktur pomiarowych wykonane zostały rachunki teoretyczne ich struktur pasmowych. Porównanie wyników pomiarów DLTS umożliwiło określenie z którego obszaru fotoogniwa pochodzi dany defekt, jak i określenie roli defektów powierzchniowych. Ponadto pomiary wykonano dla dwóch orientacji heterostruktur – (111)B i (100).

Dla analogicznych struktur wykonano pomiary widm fotoluminescencji. Wyniki tych pomiarów omówiono w rozdziale szóstym doktoratu. Zmierzona została także zależność temperaturowa widm fotoluminescencji. Uzyskane wyniki pomiarowe skorelowano z wynikami pomiarów DLTS typując który z defektów daje wkład do określonego pasma emisyjnego. Wykazano pełną korelację pomiędzy wynikami uzyskanymi z pomiarów dwóch zastosowanych metod badawczych. Autorka (na podstawie danych literaturowych) proponuje możliwą identyfikację poszczególnych pasm emisyjnych (wkład defektów do pasm emisyjnych).

Rozdział siódmy to krótkie podsumowanie uzyskanych wyników. Ciekawą konkluzją jest tutaj stwierdzenie, że parametry pułapek (w tym energie jonizacji) nie zależą od zastosowanej technologii, a są one wyłącznie właściwością badanego materiału.

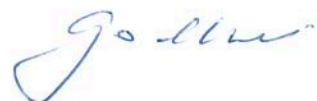
Podsumowując uważam, że w pracy zawarte są istotne wyniki badawcze. Formalnie można powiedzieć, że jest to prosta praca – zmierzono widma DLTS i fotoluminescencji i je zanalizowano. Tak jednak nie jest. Autorka zastosowała bardzo oryginalne podejście eksperymentalne umożliwiające określenie rozkładu defektów w badanych fotoogniwach, a także identyfikację defektów powierzchniowych. Zawarta w rozprawie analiza potwierdza znakomite zrozumienie przez doktorantkę badanego problemu (defektów występujących w heterozłączach HgCdTe). Jestem przekonany, że autorka rozprawy jest już dojrzałą badaczką i będzie mogła samodzielnie realizować w przyszłości dalsze zagadnienia naukowe.

Uwagi

Złożona rozprawa jest napisana bardzo dobrze. Jedyna moja uwaga krytyczna dotyczy opisu możliwych procesów rekombinacyjnych ekscytonów związanych (patrz wyżej). Nie mam innych uwag krytycznych do treści/wyników rozprawy. Praca jest napisana bardzo starannie i potwierdza dużą wiedzę doktorantki w zakresie prowadzonych badań. Podanych jest 95 referencji do prac w tematyce doktoratu. Przedstawione wyniki są oryginalnym osiągnięciem doktorantki. Uważam, że praca jest wzorowa! Dlatego też wnioskuję o wyróżnienie tego doktoratu.

Podsumowanie recenzji

Podsumowując, uważam że uzyskane w rozprawie wyniki są **bardzo wartościowe**. **Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr. inż. Kingi Majkowycz spełnia wszystkie wymagania formalne stawiane pracom doktorskim w odpowiednich ustawach.** **Wnioskuję dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania.** **Jednocześnie doceniając znaczenie przedstawionych w rozprawie rezultatów składam wniosek o wyróżnienie doktoratu.**



Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie

Praca doktorska Pani Majkowycz dotyczy niezwykle ważnego zagadnienia badawczego – optymalizacji fotodiod HgCdTe w celu poprawy parametrów ich pracy, a w szczególności określenia roli stanów defektowych. Zastosowana metoda „profilowania” defektów w skomplikowanych heterostrukturach jest oryginalna i umożliwiła doktorantce określenie roli różnych stanów defektowych, w tym defektów związanych z powierzchnią. Doceniam duże znaczenie praktyczne prowadzonych prac badawczych. Biorąc pod uwagę oryginalność zastosowanego podejścia eksperymentalnego i fachowość opisu uzyskanych wyników wnioskuję o wyróżnienie tego doktoratu.

