

Warszawa 23.02.2015

prof. dr hab. Małgorzata Igalson
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

**Recenzja pracy doktorskiej mgr Karoliny Wichrowskiej
n.t. "Defekty strukturalne w heterozłączach półprzewodnikowych na bazie CdTe"**

Praca doktorska mgr Karoliny Wichrowskiej z d. Olendcr dotyczy defektów w epitaksjalnym tellurku kadmu - materiale, który ciągle nie traci swojego znaczenia nie tylko dla zastosowań fotowoltaicznych, czy w czujnikach podczerwieni, ale także w nowatorskich aplikacjach opartych o studnie kwantowe. Zadziwiające, że tak niewiele w sumie mamy potwierdzonych, jednoznacznych i nie podlegających wątpliwościom informacji o defektach w tym wydawać by się mogło dobrze znanym i przebadanym materiale. Praca p. Wichrowskiej usiłuje wypełnić tę lukę.

We wstępie Autorka oprócz zarysu problematyki pracy formułuje jej cele, do których należy weryfikacja i uzupełnienie stanu wiedzy nt. defektów w CdTe. W dalszej części pracy zawarty jest opis własności a także przegląd literaturowy dotyczący badań defektów w tym związku. Wynika z niego, że rzeczywiście tematyka defektów w CdTe obfituje w kontrowersje i brak jest jednoznacznego określenia natury defektów odpowiedzialnych za poszczególne poziomy energetyczne ujawniające się w eksperymencie. Zatem podjęcie tej tematyki jest w pełni uzasadnione.

W dalszej części pracy zawarty jest ogólny przegląd różnych typów defektów punktowych i liniowych w półprzewodnikach, włączając w to defekty silnie sprzężone z siecią, których parametry zależną od współrzędnej konfiguracyjnej. Wprowadzono pojęcia, którymi posługiwać się będzie Autorka w dalszej części pracy, takie jak szybkość emisji termiczne, przekrój czynny na wychwyty swobodnych nośników, rozróżnienie między pułapkami elektronowymi i dziurowymi. Omówiono wpływ pola elektrycznego na parametry elektronowe centrów pułapkowych.

Dalej omówione zostały w szczególności metody pomiarowe wykorzystane w tej pracy. Najwięcej uwagi poświęcono niestacjonarnej spektroskopii głębokich poziomów DLTS. Ponieważ jest to technika złączowa, omówienie rozpoczyna informacje dotyczące złączy pn i Schottky'ego. Ponieważ praca w przeważającej części jest poświęcona heterozłączom, trochę brakuje informacji dotyczących tego typu struktur, w szczególności n.t. wpływu heterointerfejsu na wyniki pomiarów pojemnościowych. Dla pełnego obrazu brakuje mi tu też omówienia sposobu wyznaczania poziomu domieszkowania badanych próbek. Przedstawiono natomiast dosyć szczegółowo podstawy i metodologię DLTS włączając w to także omówienie kształtu i właściwości pików DLTS w zależności od natury defektów. Poza badaniami DLTS Autorka analizowała własności warstw CdTe pod względem

krystalograficznym, więc zamieszczono w tym rozdziale opis transmisyjnej mikroskopii elektronowej TEM oraz wysokorozdzielczej dyfraktografii rentgenowskiej.

Kolejny rozdział poświęcony został opisowi badanych próbek. Tu trzeba zwrócić uwagę na to, że Autorka wybrała do badań próbki o różnej stechiometrii i typie domieszkania, nie tylko heterozłącza, ale także diody Schottky'ego. Strategia taka pozwala na pogłębioną dyskusję otrzymanych wyników i zwiększa wiarygodność wniosków.

Następny rozdział zawiera pomiary i dyskusję DLTS. Trochę szkoda, że Autorka przyjęła taką kolejność prezentacji wyników - dla mnie byłoby bardziej naturalne, żeby własności strukturalne próbek przedstawić przed pomiarami DLTS, gdyż byłoby od razu wiadomo z jak doskonałym (lub niedoskonałym) materiałem mamy do czynienia, a to powinno ułatwiać dyskusję wyników spektroskopowych. Ale to jest kwestia osobistych upodobań i z pewnością nie wpływa na ogólną ocenę pracy. Omówienie wyników DLTS Autorka słusznie rozpoczyna od prezentacji i dyskusji spektrów otrzymanych na diodach Schottky'ego typu n i typu p. Wyróżniono tu pułapki elektronowe odpowiadające defektom punktowym E1 i E2. Poziom E2 zdaniem Autorki może być związany z luką kadmową. Mamy dalej pogłębioną analizę piku E3, z której wynika, że pochodzi on od dyslokacji propagujących się od podłoża. Wyróżniono tu także dziurową pułapkę H2, ale tę interpretację uważam za dyskusyjną gdyż szybkości emisji w porównaniu do H2 zmierzonego w materiale typu n różnią się o dwa rzędy wielkości. Zresztą trudno oczekiwać sygnału od pułapki nośników mniejszościowych w diodzie Schottky'ego. W diodach typu n wyróżniono kilka pułapek dziurowych, niektóre z nich przypisano dyslokacjom ze względu na nieeksponencjalny charakter narastania amplitudy sygnału w funkcji długości impulsu. Sporo uwagi Autorka poświęciła pułapce H5 - zbadała wpływ pola elektrycznego na przekrój czynny oraz wpływ obróbki powierzchni na jej koncentrację i parametry elektronowe.

W kolejnych rozdziałach Autorka omawia wyniki pomiarów DLTS dla heterozłączy na podłożu GaAs, w których zaobserwowano oprócz poziomów obecnych w złączach Schottky'ego także poziomy związane z defektami rozciągniętymi. Niektóre z nich nie ujawniły się w heterozłączach na podłożu z CdTe, co potwierdza trafną interpretację poprzednio otrzymanych wyników. Wyniki badań złączy wykonywanych z nadmiarem i niedoborem telluru Autorka wykorzystuje do potwierdzenia swoich tez dotyczących natury defektu H6.

Rozdziały 5 i 6 poświęcone są badaniom dyslokacji metodą TEM oraz ocenę jakości krystalograficznej i odkształceń metodą dyfrakcji rentgenowskiej. Tu Autorka również ujawnia swoje wysokie kompetencje prezentując wnikliwą analizę defektów liniowych obserwowanych w heterostrukturach na podłożu GaAs oraz analizując naprężenia i stopień relaksacji materiału poprzez dyslokacje. Z porównania szerokości połówkowych krzywych odbić wynika zgodnie z przewidywaniem, że gęstość dyslokacji jest o rząd wielkości większa jeśli warstwa jest wzrastana na podłożu o gorszym dopasowaniu sieciowym.

W ostatnim rozdziale następuje zbiorcze przedstawienie wszystkich poziomów obserwowanych w badanych strukturach w tym 5-ciu poziomów związanych z defektami punktowymi wraz próbami przyporządkowania ich konkretnym defektom rodzimym w CdTe. Zebrano tu także argumenty świadczące o rozciągniętym charakterze niektórych defektów.

Moje uwagi dotyczące drobnych uchybień, jakie widzę w tej pracy, wymieniam poniżej.

1. Brak oceny dokładności wyznaczanych parametrów elektronowych poziomów energetycznych, poziomu domieszkowania i koncentracji defektów. Ponieważ ta ostanta zależy od poziomu domieszkowania, błąd N_d przekłada się wprost na dokładność w ocenie koncentracji obserwowanych stanów pułpkowych. Autorka ogranicza się tylko do podania wartości N_d , jednakże jeśli zwrócić uwagę na histerezę charakterystyk CV pokazaną w dalszej części pracy można mieć uzasadnione wątpliwości co do dokładności określenia poziomu domieszkowania w obecności stanów powierzchniowych zaburzających profilowanie CV.

2. Autorka czasem przytacza odnośniki literaturowe wg. których identyfikuje poziomy, posilując się przede wszystkim zbliżonymi wartościami energii aktywacji. Taka klasyfikacja może być myląca: "fingerprint" defektu składa się z dwu parametrów: oprócz energii również liczy się czynnik przedeksponencjalny. Ciekawa jestem, czy Autorka skonfrontowała swoje wyniki z literaturowymi danymi w dokładniejszy sposób (np sprawdzając przynajmniej czy piki pojawiają się w podobnym zakresie temperatur/okien emisji). Szkoda, że nie ma rysunków, na których byłyby przedstawione zbiorcze wykresy Arrheniusa dla tego samego wg Autorki poziomu, ale obserwowanego w różnych próbkach i ew. także poziomów opisanych w literaturze. Takie porównanie mogłoby stanowić przekonywujący dowód na słuszność prezentowanych przez Autorkę wniosków dotyczących natury defektów.

3. W podsumowaniu trochę brakuje mi tabelki podsumowującej wszystkie wyniki, np w formie:

defekt - parametry elektronowe - gdzie zaobserwowany - natura - ew. odnosnik literaturowy.
Ułatwiłoby to czytelnikowi ogarnięcie najważniejszych rezultatów jednym rzutem oka.

Moje uwagi przedstawione powyżej nie zmieniają ogólnej oceny pracy, którą uważam za znakomitą. Praca napisana jest w sposób klarowny, redakcja jest bardzo staranna - udało mi się dostrzec bardzo nieliczne błędy korektorskie. Zawiera kompetentną, pogłębioną analizę wyników eksperymentalnych, za którą idą dodatkowe dobrze pomyślane eksperymenty. Dzięki temu argumenty na poparcie wniosków o naturze badanych centrów są bardzo przekonujące. Dobór próbek do badań (oprócz heterozłączy także Schottky, warstwy wzrastane na różnych podłożach) wzmacnia siłę tych argumentów. Oryginalne rezultaty badań strukturalnych dostarczyły cennych informacji o dyslokacjach w CdTe wzrastanym na niedopasowanym sieciowo podłożu. W każdym rozdziale Autorka demonstrowuje swoją głęboką znajomość przedmiotu i metodyki prowadzonych badań, umiejętność trafnego doboru argumentów uzasadniających prezentowane tezy. W sumie uważam, że Autorka zrealizowała cel, który sobie postawiła na początku pracy, przedstawiając dobrze uzasadniony zbiór informacji o punktowych i liniowych defektach w CdTe.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca spełnia z naddatkiem wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, a ze względu na moją wysoką ocenę pracy jak i bogaty dorobek publikacyjnego p. Wichrowskiej stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

