

Prof. dr hab. Witold Daniel Dobrowolski

Warszawa, 26-07-2010

Instytut Fizyki PAN

w Warszawie

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Tomasza Wojciechowskiego pt.

„Bistabilność przewodnictwa elektrycznego w kryształach mieszanych CdZnTe”

Praca doktorska magistra Tomasza Wojciechowskiego dotyczy półprzewodnikowych kryształów mieszanych o własnościach ferroelektrycznych. Autor podjął szeroki program doświadczalnych badań kryształów $Cd_{1-x}Zn_xTe$ w formie warstw epitaksjalnych (hodowanych przez autora rozprawy) oraz materiałów litych. Już w tym miejscu chcę zauważyć, że pracę kończy opis skonstruowanego przez doktoranta tranzystora polowego z bramką ferroelektryczną, której polaryzacja steruje koncentracją elektronów w dwuwymiarowym kanale 2D. Program badań obejmował charakteryzację strukturalną i chemiczną oraz zbadanie własności elektrycznych, optycznych i ferroelektrycznych badanego związku. Tematyka pracy doktorskiej dobrze wpisuje się w jedno z głównych zadań fizyki półprzewodników związanych z poszukiwaniem nowych funkcjonalnych materiałów. Praca liczy 106 stron, bibliografia zawiera 90 pozycji. Składa się ze wstępu, sześciu rozdziałów i podsumowania. Doktorant zamieszcza również kilkustronicowy spis swoich prac, wystąpień konferencyjnych, prezentacji plakatowych etc. Przejdę teraz do krótkiego streszczenia pracy. Po wprowadzeniu w tematykę doktoratu, zawartą we wstępie, doktorant w pierwszym rozdziale omawia zjawisko ferroelektryczne i jego zastosowania praktyczne. Rozdział II przedstawia stan wiedzy na temat zjawiska ferromagnetyzmu w $Cd_{1-x}Zn_xTe$, który Doktorant zastał w chwili podejmowania pracy doktorskiej. Autor zwraca szczególną

uwagę na problem symetrii kryształów grupy II-VI (w kryształach o symetrii blendy cynkowej nie powinno występować zjawisko ferromagnetyzmu). Drugim opisanym w tym rozdziale zjawiskiem jest zjawisko bistabilności (przechodzenia pod wpływem pola elektrycznego do stanu o wysokiej do niskiej oporności) przewodnictwa elektrycznego obserwowane w badanych kryształach. Kolejny rozdział zawiera szczegóły aparaturowe przeprowadzanych eksperymentów. Opisana jest w nim metoda hodowania warstw przy użyciu maszyny MBE oraz charakteryzacja próbek. Rozdział ten zawiera m. in. opis maszyny EPI 620, której doktorant używał do hodowania próbek. Kolejny fragment zawiera szczegółowe technologiczne dane o wyhodowanych i następnie badanych próbkach – takie jak temperatura wzrostu, skład chemiczny, grubość i orientacja krystalograficzna. W części tej podane są również informacje o badanych w celach porównawczych kryształach litych – $Cd_{1-x}Zn_xTe$ i $Cd_{1-x-y}Zn_xMnyTe$. W dalszej części doktorant opisuje wyniki charakteryzacji strukturalnej, stwierdzając, że badane materiały krystalizują w strukturze blendy cynkowej i są wolne od wytrąceń obcych faz. Dalej znajdziemy opis układu doświadczalnego do pomiarów ferroelektrycznej pętli histerezy metodą Sawyera-Towera oraz opis metod użytych do pomiarów własności elektrycznych. Rozdział kończy opis układu do pomiarów fotoluminescencji. Rozdział czwarty, najistotniejszy, zawiera wyniki pomiarów i ich częściową interpretację. Na początku autor przedstawia wyniki pomiarów zależności przewodnictwa elektrycznego od temperatury. Na przebiegach wykonanych dla próbek w stanach wysokooporowych widoczne w obszarze temperatur przejścia paraelektryk - ferroelektryk anomalie. Autor poprzez porównanie swoich wyników dla warstw z wynikami dla litych kryształów z literatury dochodzi do wniosku, że mikroskopowe przyczyny anomalii są takie same w przypadku warstw jak dla próbek kryształów litych. Kolejny fragment poświęcony jest pomiarom ferroelektrycznych pętli histerezy. Wnioskiem z tych badań jest stwierdzenie, że faza ferroelektryczna $Cd_{1-x}Zn_xTe$ występuje jedynie gdy w kryształach

występują pojedyncze izolowane atomy Zn, t.j. dla niewielkich składów x. Dalszy fragment przedstawia dane uzyskane z pomiarów przy użyciu mikroskopu ze skanującą sondą piezoelektryczną. Wnioskiem, ze tej części pracy jest stwierdzenie, że przejście do fazy ferroelektrycznej występuje lokalnie i jest ograniczone przestrzennie do obszarów submikronowych. Dopiero po tym fragmencie autor zajmuje się wielokrotnie wspomnianym wcześniej zjawiskiem bistabilności przewodnictwa elektrycznego. Pomiary efektu Halla wykonane dla próbek w fazie wysoko i niskooporowej wskazują, że zmiana stanu oporowego związana jest ze zmianą koncentracji nośników (dziur). Dalsza część rozdziału poświęcona jest pomiarom fotoluminescencji i jej zależności od stanu oporowego, temperatury i mocy pobudzania (lasera). Eksperymenty pokazały, że istnienie dwóch stanów przewodnictwa jest wynikiem zmiany liczby kompensujących donorów w próbkach $Cd_{1-x}Zn_xTe$. Rozdział kończy fragment opisujący badania czteroskładnikowych kryształów $Cd_{1-x-y}Zn_xMn_yTe$. Zasadniczo, uzyskane tu wyniki, nie odbiegają od uzyskanych wcześniej dla kryształów nie zawierających manganu. Natomiast pojawia się ciekawy wpływ stanu oporowego na własności magnetyczne. Autor wyjaśnia występujące różnice jako zmianę typu sprzężenia między jonami manganu z anty- na ferromagnetyczne w zależności od stanu oporowego. Rozdział V przedstawia interpretacji wyników. Oparta jest o model zaproponowany przez młodego teoretyka dr Pawła Jakubasa (pracę doktorską pod kierunkiem prof. dr hab. Piotra Bogusławskiego wykonywał równoległe z mgr Wojciechowskim). Ostatni rozdział opisuje wykonany przez doktoranta tranzystor z bramką ferroelektryczną. Pomiary efektu Shubnikova de Hassa i kwantowego efektu Halla potwierdzają podstawowe tezy pracy, a zarazem pokazują, że możliwe jest sterowanie przewodnictwem dwuwymiarowego gazu elektronowego przy pomocy odwracalnych zmian stanu polaryzacji bramki ferroelektrycznej. Układ taki może służyć jako komórka pamięci. Całość zamyka zwięzłe, dwustronicowe „Podsumowanie”.

Praca napisana jest ładnym, poprawnym językiem. Recenzent nie znalazł istotnych błędów, które mógłby tu zacytować. Tekst ilustrowany jest starannie przygotowanymi schematami i diagramami. Układ pracy nie budzi zastrzeżeń, choć oczywiście można sobie wyobrazić inny układ pracy. Autor wykazuje dobrą znajomość literatury tematu, o czym świadczą między innymi liczne cytowania.

Po tych słowach pochwały chciałbym poruszyć kilka kwestii, które wzbudziły moje wątpliwości, i tak na stronie 46 autor pisze: „Do pomiarów transportowych wybrano kryształ objętościowy a nie cienką warstwę, ponieważ chciano wykonać pomiary koncentracji i ruchliwości dla próbek będących zarówno w stanie wysokooporowym jak i niskooporowym. Dla kryształu objętościowego $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ stosunek oporowy jest około jednego rzędu wielkości, co pozwalało na wykonanie takich pomiarów. Pomiary takie były by nie możliwe do wykonania na cienkich warstwach będących w stanie niskooporowym, gdyż ich opór w tym stanie jest rzędu 200 Ω , co uniemożliwia wykonanie pomiarów Hall'a”. Myślę, że autor się pomylił, w stanie wysokooporowym warstwy pomiar efektu Hall'a może być trudny do zmierzenia. Nie wszystkie rysunki i przedstawione na nich wyniki są dostatecznie dobrze opisane. Porównując wyniki pętli histerezy dla składu $x=0.09$ na rysunku 4.2.1 odczytujemy wartość P bliską $2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, natomiast na rysunku 4.3.1 przedstawiającym zależność polaryzacji spontanicznej od temperatury znajdujemy dla próbki o tym składzie wartość $P=0.07 \mu\text{C}/\text{cm}^2$. Ta rozbieżność wymaga wyjaśnienia. Rysunek 4.6.1 Z niewiadomych powodów Doktorant przedstawiając zależność oporności Hallowskiej od pola wyniki umieścił na rysunku będącym lustrzanym odbiciem rysunku, którego bym się spodziewał w tym miejscu. Za poważną wadę pracy widzę również fakt, że doktorant unikał umieszczenia w pracy wzorów.

Niezależnie od powyższych, w sumie nie drobnych uchybień, należy podkreślić, że mgr Tomasz Wojciechowski w swojej pracy doktorskiej zrealizował wartościowy, bardzo szeroki

program doświadczalnych badań właściwości ferroelektrycznych mieszanych kryształów $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ i $\text{Cd}_{1-x-y}\text{Zn}_x\text{Mn}_y\text{Te}$. Doktorant umiejętnie wykorzystał szereg technik pomiarowych. Wskazuje to na dobre opanowanie przez Mgr Tomasza Wojciechowskiego metod doświadczalnych stosowanych w badaniach półprzewodników, a także świadczy o jego dużej wnikliwości i aktywności w opanowywaniu nowych, niestandardowych technik. Wyniki badawcze uzyskane przez doktoranta mają już swoje odzwierciedlenie w znacznej liczbie prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach i wydawnictwach fizycznych oraz wielu prezentacji konferencyjnych i referatów seminaryjnych. Na podkreślenie zasługuje również fakt wykonania elementu pamięci - tranzystora z bramką ferroelektryczną.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Tomasza Wojciechowskiego pt. **Bistabilność przewodnictwa elektrycznego w kryształach mieszanych CdZnTe** spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

