

dr hab. Jerzy Żuk, prof. nadzw.
Instytut Fizyki UMCS, Lublin

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
p. mgr. Krzysztofa Pysznika
„Wykorzystanie zjawisk towarzyszących bombardowaniu jonowemu
w diagnostyce procesu implantacji”

Przedstawiona do oceny rozprawa poświęcona jest doświadczalnym badaniom efektów oddziaływania jonów o średnich energiach z ciałem stałym. Rozwój w XX wieku techniki elektromagnetycznej separacji izotopów oraz postępy fizyki wiązek jonowych pozwoliły na upowszechnienie w zastosowaniach przemysłowych techniki implantacji jonów. Większość współczesnych aplikacji szeroko-wiązkowej implantacji jonów dotyczy mikroelektroniki półprzewodnikowej oraz modyfikacji właściwości mechanicznych powierzchni, głównie metalicznych. W ostatnich latach także mikrowiązki jonowe zaczęły odgrywać dużą rolę w nanotechnologii, preparatyce próbek dla mikroskopii elektronowej, czy też w badaniach biologicznych.

Praca doktorska została wykonana pod kierunkiem p. prof. dr hab. Dariusza Mączki w Zakładzie Fizyki Jonów i Implantacji UMCS. Mgr Krzysztof Pysznik wykonał cały szereg prac projektowych i konstrukcyjnych, doprowadzając do uruchomienia kilku stanowisk eksperymentalnych dla badań widm emisyjnych promieniowania rentgenowskiego oraz światła, generowanych wskutek bombardowania ciała stałego wiązką jonów. Zbudował także układ do rozpylania jonowego jonami o średnich energiach. Przy użyciu tak powstałej aparatury Autor przebadał cały szereg tarcz materiałów metalicznych i półprzewodnikowych, uzyskując wiele interesujących rezultatów. Wyniki te, w większości już opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, przedstawione zostały w obszernych trzech rozdziałach, które łącznie stanowią przeważającą część rozprawy doktorskiej. Ich struktura jest zbliżona i zawiera prezentację podstaw opisu teoretycznego danego zjawiska fizycznego lub też grupy zjawisk mu towarzyszących, szczegółowe przedstawienie konstrukcji i działania układu pomiarowego oraz podanie wyników przeprowadzonych badań. Dodatkowo rozprawa zawiera cztery rozdziały: dwa wprowadzające, dotyczące implantacji jonowej oraz procesów

oddziaływania jonów z materia, rozdział opisujący implantator jonów UNIMAS 79 oraz w końcu pracy – podający przykłady wykorzystania techniki implantacji. Każdy z rozdziałów stanowi integralną całość i posiada własny spis literatury, co jest raczej rzadkością przy pracach doktorskich, natomiast często stosowaną w monografiach naukowych. Moim zdaniem taka struktura pracy ułatwia studiowanie tej rekordowo obszernej, bo złożonej z 469 stron rozprawy.

Przejdę teraz do bardziej szczegółowego opisu poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej p. K. Pyszniaka. We wprowadzeniu przedstawione są główne cele pracy doktorskiej, z których pierwszym jest analiza zjawisk towarzyszących implantacji jonowej pod kątem ich wykorzystania do monitorowania *on-line* procesu implantacji. Badane zjawiska to: rozpylanie jonowe, emisja promieniowania X oraz emisja jonowa-fotonowa i jonoluminescencja. Drugim celem pracy jest wyznaczenie wartości współczynników rozpylania oraz rozkładów głębokościowych zaimplantowanych atomów domieszki.

Bardzo wartościowe, ale i trudne badania rozpylania jonowego w obszarze średnich energii jonów padających wymagały budowy stanowiska pomiarowego z kwadrupolowym spektrometrem mas, sprzężonego z elektromagnetycznym separatorem izotopów WID 63. Badania rozpylania jonowego nabierają współcześnie aktualności ze względu na nową dziedzinę badań doświadczalnych i teoretycznych dotyczącą zmian morfologii powierzchni pod wpływem rozpylania (*sputter patterning*). W rozprawie doktorskiej przedstawiono całą procedurę związaną z prawidłowym zestawieniem układu, jego kalibracją oraz opis metodyki pomiarów, których celem było uzyskanie wiarygodnych widm energetycznych jonów wtórnych. Tabela 4.5 zawiera otrzymane z badań wartości względnych współczynników emisji wtórnej jonów Si i Ti dla energii jonów argonu: 20 i 30 keV. Na podkreślenie zasługuje także przeprowadzenie obliczeń numerycznych przy użyciu programu SATVAL widm jonów wtórnych w celu porównania z wynikami eksperymentu. Zgodnie z deklaracją Autora stanowisko eksperymentalne do badania rozpylania jonowego jest w pełni kompatybilne z traktem jonowym implantatorem jonów UNIMAS 79, co przekłada się na możliwość wykonywania pomiarów także przy wyższych energiach jonów pierwotnych.

W rozdziale „Emisja promieniowania rentgenowskiego” liczącym 180 stron autor przedstawia podstawy fizyczne powstawania ciągłych i dyskretnych widm promieniowania X, mechanizm jego oddziaływania z materia oraz opisuje wzbudzanie widm rentgenowskich wiązkami

jonowymi. Następnie scharakteryzowane są detektory półprzewodnikowe, podana jest szczegółowa budowa elektronicznego spektrometru promieniowania X. Autor w dalszej części tego rozdziału szczegółowo opisuje stanowisko pomiarowe sprzężone z implantatorem jonów UNIMAS 79, otrzymywanie charakterystyk cechowania spektrometru, wyznaczanie charakterystyki transmisyjnych okienek mylarowych i inne ważne procedury. Przechodząc do części zawierającej wyniki eksperymentu, należy zauważyć jego szeroki zakres. Cechowanie spektrometru zawiera wyniki uzyskane przez bombardowanie wiązką protonów o energii 250 keV tarcz aż 13 pierwiastków, od tytanu do ołowiu. Otrzymano cały szereg emisyjnych widm rentgenowskich z użyciem jonów: H^+ , H_2^+ , N^+ o energii w zakresie 100 – 300 keV w celu wyznaczenia zależności od energii jonu względnej wydajności emisji promieniowania X dla linii L (Mo) oraz K (Ga) i (P) (Tabele 5.4 i 5.5). Bardzo szczegółowe badania dotyczyły wzbudzania emisji X w ciężkich tarczach ($Z = 40$ do 82) przy pomocy jonów argonu. Otrzymane przebiegi względnej wydajności emisji promieniowania X w funkcji liczby atomowej pierwiastka tarczy ujawniły maksima, zarówno dla linii L, jak i M, co może być wyjaśnione efektem przekrywania się poziomów energetycznych atomu materiału tarczy i „pocisku” - jonu Ar^+ . Metodą spektroskopii X badano również procesy nasycenia argonem warstw przypowierzchniowych Mo i Al wraz ze wzrostem dawki jonów Ar^+ deponowanych w próbce. Podobny eksperyment wykonano bombardując te same tarcze protonami. Wyniki powyższe mogą mieć istotne zastosowanie w diagnostyce materiałów modyfikowanych wiązkami jonowymi.

Kolejny rozdział pracy mgr Pyszniaka zawiera wyniki badań emisji optycznej, która towarzyszy oddziaływaniu jon-tarcza. Podobnie jak dla technik omawianych wcześniej, zasługą Autora jest bardzo istotny udział w budowie aparatury pomiarowej. Dodać należy, że zarówno emisja światła przez rozpylane z tarczy atomy lub molekuly, zwana czasami emisją jonowo-fotonową, jak również jonoluminescencja nie należą do zjawisk często badanych. Wyróżnić należy otrzymane przy użyciu pierwszej z powyższych metod rozkłady głębokościowe koncentracji atomów manganu i glinu, zaimplantowanych wcześniej do płytek półprzewodnikowych (Si, GaAs, SiC) i następnie rozpylonych jonami argonu lub bizmutu o energiach 80 oraz 120 keV. Wyznaczone wartości współczynników rozpylania okazały się być moim zdaniem nadspodziewanie zgodne z uzyskanymi w symulacjach komputerowych.

Praca napisana jest przejrzysto z logicznym układem treści. Nie mam zastrzeżeń odnośnie słownictwa i formy lub też ścisłości wyrażanych myśli. Rozprawa jest starannie opracowana

pod względem technicznym. Pewnym wyjątkiem okazuje się być spis literatury, gdzie Autor nie jest konsekwentny przy zamieszczaniu tytułów wszystkich publikacji. Skrót PIXE oznacza "Particle-" a nie Photon-induced X-ray Emission (str. 23). Na tej samej stronie użyty jest skrót BLE (Bombardment-induced Light Emission), podczas gdy w innych miejscach pracy stosowany jest szeroko termin „Emisja jonowo-fotonowa”.

Podsumowując, praca doktorska mgr. Pyszniaka jest wartościowym, obszernym kompendium wiedzy dotyczącej oddziaływania jonów o średnich energiach z ciałem stałym. Wyczerpująco opisane są podstawy fizyczne zjawisk towarzyszących implantacji jonowej, przedstawiona aparatura badawcza i metodyka oraz podane zostały wyniki kilku istotnych eksperymentów przeprowadzonych z użyciem wiązek jonów. Jestem przekonany, że rozprawa p. K. Pyszniaka stanowić będzie ważną pozycję literaturową dla studentów i doktorantów. Po jej przeczytaniu jestem osobiście pod wrażeniem dojrzałości naukowej oraz pracowitości Autora.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia całkowicie wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Uwzględniając omówione powyżej osiągnięcia p. magistra Krzysztofa Pyszniaka stawiam wniosek o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Jerzy Żuk, prof. nadzw.

Lublin, 28 marca 2016 r.