

## **R e c e n z j a**

rozprawy doktorskiej mgr Krzysztofa Pyszniaka

**Wykorzystanie zjawisk towarzyszących bombardowaniu jonowemu w diagnostyce procesu implantacji**

wykonanej pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Dariusza Mączki

Recenzowana rozprawa zawiera opis budowy i uruchomienia trzech unikalnych stanowisk eksperymentalnych przy implantatorze UNIMAS 79i elektromagnetycznym separatorze izotopów WID63 Zakładu Fizyki Jonów i Implantacji Instytutu Fizyki UMCS (Lublin): stanowisko do badania rozpylania jonowego, stanowisko do badania emisji promieniowania rentgenowskiego oraz stanowisko do badania emisji jonowo-fotonowej i jonoluminescencji, a także niezbędne specjalistyczne oprogramowanie. Przy pomocy tych zaprojektowanych i utworzonych stanowisk eksperymentalnych wykonano przytwórczym i aktywnym udziale Autora szereg interesujących i praktycznie ważnych eksperymentów dotyczących analizy procesu rozpylania dla dowolnej kombinacji bombardujący jon – tarcza oraz przeprowadzono kompleksową analizę zjawisk zachodzących w różnych tarczach w dostatecznie szerokim zakresie szeregu parametrów warunkujących proces implantacji. Są to: emisja charakterystycznego promieniowania X, emisja fotonów oraz emisja jonów wtórnych pod wpływem bombardowania jonowego dla kilkunastu wybranych kombinacji tarcza-jon. Wyniki tych badań mają ważne znaczenie praktyczne i poznawcze, zwłaszcza dla diagnostyki procesu implantacji.

W pracy przedstawiono szeroką gamę różnorodnych wyników doświadczalnych, popartych analizą porównawczą i obliczeniami modelowymi, które posiadają również znaczenie praktyczne. W szczególności, w oparciu o analizę widm energetycznych i masowych jonów wybitych oraz charakterystyki hamowania elektronów wtórnych i ich rozkłady energii wnioskowano, że wielkość napięcia ekstrakcyjnego (NE) znacząco wpływa na wartości natężeń wtórnych prądów jonowych. Jednak zwiększenie NE powoduje także niekorzystne zmiany innych parametrów źródła jonów i implantatora jonów (np. zdolności rozdzielczej mas - ZRM). Ustalono następnie przedział optymalnych wartości NE 70-100V, a dla wartości NE 90V wyznaczono ZRM i natężenie prądów jonowych. Oszacowano także względne współczynniki wtórnej emisji tytanu oraz krzemu z tarcz naświetlanych jonami  $Ar^+$  o energiach 20-30keV. Wyniki porównano z analogicznymi danymi literaturowymi i wynikami analizy numerycznej korzystając z programu SRIM 2008 i stwierdzono zadowalającą zgodność.

Zbadano również zjawisko promieniowania rentgenowskiego (PR) z tarcz metalicznych i półprzewodnikowych bombardowanych wiązką jonów średnich energii i wyznaczono zależności względnej emisji charakterystycznego PR z wybranych tarcz naświetlanych lekkimi jonami i  $Ar^+$  o energii, poniżej których nie rejestruje się emisji fotonów odpowiadających analizowanej linii charakterystycznej PR. Wyniki posłużyły do określenia m.in. możliwości wykorzystania wiązki jonów  $H^+$  do jakościowej analizy składu materiału tarczy: jej czułość wynosi około 1% przy energii jonów 300keV, czyli maksymalnie osiągnięte energii w implantatorze UNIMAS 79.

Ważnym zjawiskiem towarzyszącym implantacji jonów, które badano przy pomocy utworzonego specjalnego stanowiska pomiarowego i opisano w pracy doktorskiej jest emisja jonowo-fotonowa (EJF). To zjawisko można wykorzystać do oszacowania profili koncentracji

zaimplantowanych domieszek. W tym celu rozpyla się wiązkę jonów materiału analizowanej tarczy i rejestruje zmianę intensywności wybranej linii widmowej (odosobnionej i charakteryzującą się dostateczną intensywnością) w zakresie promieniowania optycznego, które emitują wybite wzbudzone atomy uprzednio zaimplantowanej domieszki. Wówczas tworzonego krateru wybijane są wzbudzone atomy domieszki, a intensywność świecenia jest proporcjonalna do ich koncentracji w rozpylanej w danej chwili warstwie. Tą metodę zilustrowano czterema przykładami zastosowania i uzyskane doświadczalnie profile porównano z wynikami symulacji programem SRIM 2010, który jest powszechnie stosowany w pracach związanych z implantacją jonów. Uwzględniając efekty wtórne występujące w metodzie EIJ uzyskano zadowalającą zgodność.

W pracy badano także zjawisko jonoluminescencji na przykładzie analizy światła emitowanego z tarczy SiC bombardowanej wiązką jonów  $H^+$  i stwierdzono bardzo duże osłabienie zjawiska przy wzroście dawki jonów padających. Autor wyjaśnił przyczyny tego zjawiska i zasugerował możliwość jego wykorzystania do określenia stopnia zdefektowania bombardowanej tarczy.

Rozprawa napisana jest w ujęciu monograficznym, co stanowi ewenement nawet w przypadku rozpraw habilitacyjnych, w których takie podejście wydaje się być szczególnie preferowane, lecz niestety, tak się nie zdarza. W obranej przez Autora formie prezentacji gros miejsca zajmuje podręcznikowy opis zjawisk towarzyszących procesowi implantacji jonów i obszerny spis odnośnej literatury. Brak jednak w tym spisie bardzo ważnej pozycji Chr. Lehmann. *Introduction of radiation with solids and elementary defect production*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, N.Y., Oxford, 1977. Można było również posłużyć się monografią IEA N.11 z 2007 r. o współbrzmiejącej problematyce pt. *Energy loss of swift ions in polycrystalline targets*, autor F. Nickel. Jeśli chodzi o przedstawione w rozprawie problemy ogólnofizyczne, to proporcjonalnie do pozostałych należałoby znacznie więcej uwagi poświęcić opisowi metodyki RBS, która jest powszechnie stosowana do badania składu powierzchni materiałów po implantacji, również tzw. implantacji skojarzonej. W dodatku mając na uwadze dalsze wykorzystanie tego bogatego materiału o charakterze ogólnopoznawczym np. w celach dydaktycznych sugerowałbym też uzupełnić go o opis współczesnych metod precyzyjnego badania powierzchni materiałów poprzez zastosowanie mikroskopii sił atomowych.

Implantacja jonów jest od lat powszechnie stosowaną metodą modyfikacji i wytwarzania materiałów o właściwościach i wymiarach, których nie można osiągnąć innymi sposobami. Na przykład dzięki unikalnym możliwościom zastosowania tej metody istnieje i nadal rozwija się burzliwie mikroelektronika i fotonika z ogromnymi implikacjami praktycznie we wszystkich dziedzinach życia. Sama metoda jest również nadal rozwijana, np. w kierunku wytwarzania strumieni pojedynczych jonów danego rodzaju następujących po sobie w sterowanych odcinkach czasu i lokowanych w konkretnych miejscach tarczy z dokładnością kilku Å. Bardzo istotne jest także, jak i w jakim stopniu implantowane jony wpływają na powierzchnię implantowanego materiału. Wiadomo, że jest to bardzo skomplikowane zjawisko zachodzące na międzyatomowym poziomie strukturalnym, które nie można uprościć modelowo do sekwencji oddziaływań dwuciałowych. Dlatego też odnośne eksperymenty wykorzystujące różnorodne podejścia metodyczne mają tutaj istotne znaczenie praktyczne i poznawcze. Należy szczególnie podkreślić, że Zakład Fizyki Jonów i Implantacji Instytutu Fizyki UMCS, w którym dotychczas wykonano liczne i bardzo różnorodne badania doświadczalne, a część z nich została przedstawiona przez Doktoranta, jest jednym z wiodących ośrodków naukowych w dziedzinie badania i rozwoju źródeł

jonowych oraz badania zjawisk towarzyszących implantacji jonów. Ponadto aparatura doświadczalna jest tam twórczo rozbudowywana poszerzając możliwości i zakres prowadzonych badań. Wyniki tych prac są szeroko publikowane. Warto także dodać, że implantator UNIMAS 79 został zbudowany w IBJ (Świerk) w 1979r, natomiast znacznie wcześniej, bo w 1963r zbudowano w UMCS elektromagnetyczny separator izotopów WID63 zaprojektowany przez W.Żuka, J.Pomorskiego i D.Mączkę.

Nie wnoszę żadnych zastrzeżeń co do aktualności i poziomu naukowego przedstawionych w rozprawie doktorskiej mgr. Krzysztofa Pysznika wyników. Jednak zapewne ta prezentacja byłaby bardziej czytelna, gdyby Autor dokonał wyraźnego oddzielenia części ogólnopoznawczej od właściwej zawartości merytorycznej swojej rozprawy (np. cz.1 i cz.2). W konkluzji stwierdzam, że recenzowana praca całkowicie spełnia warunki stawiane przed rozprawami doktorskimi, a jej autor, mgr. Krzysztof Pysznik, bez wątpienia zasługuje na nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk fizycznych.

