



Kierownik Zakładu:
prof. dr hab. Ryszard Czajka
e-mail: ryszard.czajka@put.poznan.pl
tel.: 61-665 3200, 61-665 3234

Poznań, 18 stycznia 2016 r.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ
mgr. inż. Jakuba Jankowskiego
pt. „Czujnik Halla na ekstremalny zakres temperatur,
odporny na promieniowanie neutronowe”

Rozwój współczesnej elektroniki w coraz większym stopniu oparty jest na układach o dużej skali integracji obejmujących, m.in. procesory, które składają się z wielu miliardów tranzystorów, o rozmiarach sięgających pojedynczych nanometrów. Nie mniej, istnieje ciągle duże zapotrzebowanie na sensory wielu wielkości fizycznych, m.in. pola magnetycznego, których rozmiary ulegają redukcji do skali submikronowej, ale stopień redukcji nie jest na tyle duży, żeby pojawiły się rozmiarowe efekty kwantowe. Dużą grupę takich sensorów stanowią cienkowarstwowe czujniki pola magnetycznego działające w oparciu o klasyczne zjawiska, takie jak zjawisko Halla czy zjawisko nadzwyczajnego magnetooporu. Sensory tego typu często muszą działać w ekstremalnych warunkach środowiskowych, np. w szerokim zakresie temperatur, ciśnień czy wilgotności lub w warunkach, w których są narażone na promieniowanie jonizujące czy różnych innych cząstek materii o energiach kinetycznych rzędu MeV.

Przedstawiona mi praca doktorska Pana mgr inż. Jakuba Jankowskiego jest poświęcona właśnie wytworzeniu cienkowarstwowych czujników Halla na szeroki zakres temperatur i odpornych na promieniowanie neutronowe. Zapotrzebowanie na tego typu sensory łączy się oczywiście z ich pracą w bliskim otoczeniu reaktorów atomowych i tokamaków.

Praca doktorska p. J. Jankowskiego, powstała pod opieką naukową prof. dr. hab. Macieja Oszwałdowskiego, wybitnego specjalisty w zakresie wytwarzania i charakteryzowania czujników pola magnetycznego działających w oparciu o ww. zjawisko Halla czy efekt nadzwyczajnego magnetooporu, wytwarzanych na różnych podłożach i w różnych geometriach, celem optymalizacji parametrów pracy tych czujników w zależności od warunków pracy.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska składa się z sześciu rozdziałów, podsumowania oraz dwóch dodatków dotyczących przekrojów czynnych In i Sb oraz z wykresami zmian ruchliwości elektronów w kilku próbkach po cyklach wygrzewania w zakresie od 150°C 400°C. Całość uzupełnia wykaz oznaczeń, spis rysunków, tabel i bibliografia z 74 odnośnikami literaturowymi.

Układ pracy, w zakresie podstawowych rozdziałów, jest prosty i logiczny. W krótkim „Wstępie” Doktorant przedstawił cel i motywację podjęcia badań. Następnie, w „Zagadnieniach wprowadzających” zawarł opisy podstawowych zjawisk (Halla i Gaussa) i materiałów wykorzystywanych w konstrukcji sensorów Halla oraz krótki przegląd podstawowych zagadnień w zakresie oddziaływania promieniowania neutronowego z materią. W kolejnym rozdziale Doktorant przedstawił stan wiedzy dotyczący tematu rozprawy. W pierwszej części opisuje głównie doświadczenia swojego promotora oraz wspólne dotyczące opracowania technologii wytwarzania czujników Halla na ekstremalne zakresy temperatur, opublikowane w kilku pracach. Najważniejszą jest niewątpliwie artykuł w czasopiśmie „SENSORS” w 2011 r., w którym Doktorant jest pierwszym współautorem. W drugiej części dominują informacje poświęcone pracom pani Bolschakovej z Politechniki Lwowskiej, które rzeczywiście najobszerniej opisują badania materiałów używanych do konstrukcji czujników Halla poddanych napromieniowaniu wiązkami nisko- i wysokoenergetycznymi neutronami i do których najczęściej odnosi się Doktorant w dyskusji własnych wyników. W rozdziałach dotyczących opisu używanej aparatury oraz metodologii wytwarzania i charakteryzowania próbek, Doktorant opisuje mi.in swój wkład w rozwój tej aparatury oraz w ulepszenie technologii wytwarzania. Uważam, że należy docenić wysiłki Doktoranta w tym zakresie, ponieważ miał do wykorzystania bardzo skromne środki finansowe i technicznie przestarzałe napyłarki próżniowe, pracujące co najwyżej na poziomie tzw. wysokiej próżni, a nie bardzo wysokiej próżni. Mimo tych technicznych ograniczeń, wytworzone czujniki ostatecznie wykazały, że są rzeczywiście odporne na szeroki zakres temperatur i na promieniowanie neutronowe.

Najważniejszy rozdział w każdej pracy doktorskiej to ten poświęcony raportowi z badań własnych oraz zawarta w nim dyskusja wyników. Podobnie jest w tym przypadku – Doktorant w Rozdziale 6 przedstawił kolejno wyniki badań nad napromieniowaniem neutronowym cienkich warstw InSb (podrozdział 6.1), a następnie badania nad wytworzeniem cienkich warstw związku trójskładnikowego InGaSb z nadzieją, że ten materiał, po optymalizacji składu stechiometrycznego, będzie można wykorzystać do konstrukcji czujnika pracującego w bardzo szerokim (autor używa pojęcia „ekstremalny”) zakresie temperatur (podrozdział 6.2).

Poprawnie metodycznie, Doktorant poddał badane próbki stabilizacji temperaturowej, poprzez cykle wygrzewania w zakresie, którego górna granica temperatury była wyższa niż spodziewana po umieszczeniu tych próbek w reaktorze atomowym. Dzięki temu mógł przyjąć założenie, że większość zmian pojawiających się w strukturze próbek można tłumaczyć efektem napromieniowania neutronami. Niestety, dalej pojawiają się trudności związane z niejednoznacznymi rezultatami otrzymanymi dla poszczególnych próbek np. dotyczących wartości ruchliwości elektronów czy ich koncentracji. Przyczyna jest stosunkowo prosta – ograniczona liczba próbek, którą Doktorant mógł przekazać do napromieniowania neutronami czy to w Świerku czy w Reżu (Czechy) i dodatkowo, czas prowadzenia tego eksperymentu, szczególnie oczekiwanie na odpowiednio niski poziom radioaktywności próbek. Powtórzenie wszystkich eksperymentów na próbkach tego samego rodzaju lub odpowiednio zmodyfikowanych na podstawie analizy poprzednich pomiarów, rozciągnęłoby realizację pracy doktorskiej o kilka lat.

Mimo tych naturalnie opóźniających realizację prac badawczych czynników, Doktorantowi udało się dość szeroko przedyskutować wyniki eksperymentów i na tej podstawie zasugerować optymalne schematy badawcze dla przyszłych badań podobnych układów czy czujników. M.in. Doktorant ustalił, że limit przyrostu koncentracji w procesie napromieniowania neutronami o widmie naturalnym wynosi $2,3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ i jest niezależny od pierwotnego poziomu koncentracji. Z kolei dla próbek o bardzo wysokiej początkowej koncentracji nośników, powyżej 10^{19} cm^{-3} (np. domieszkowanych tellurem), wzrost tego parametru w wyniku transmutacji jest na tyle mały, że można go pominąć. Ten wynik sugeruje możliwość wytworzenia czujników z warstwami InSb słabo wrażliwych na napromieniowanie neutronami termicznymi przy jednocześnie lepszej stabilności temperaturowej, co było jednym z celów prac badawczych Doktoranta. W przypadku próbek napromieniowanych w strumieniu neutronów o widmie filtrowanym, Doktorant ustalił, że zmiany koncentracji elektronów w wyniku napromieniowania zależą od początkowej wartości koncentracji. Wykazał także możliwość zmiany typu przewodnictwa z n-InSb do p-InSb oraz zaobserwował wzrost ruchliwości elektronów w zależności od temperatury podczas cykli wygrzewania w zakresie $150^\circ\text{C} \div 300^\circ\text{C}$.

Podsumowując, dzięki tym badaniom i analizie wyników, Doktorant mógł stwierdzić, że wytworzone czujniki mogą działać w szerokim (ekstremalnym) zakresie temperatur i w środowisku narażonym na działanie naświetlania strumieniami cząstek materii (np. neutronów), które charakteryzują się energiami z szerokiego zakresu energii od 0,001 eV do 10 MeV.

Ostatnim tematem badawczym zawartym w niniejszej pracy doktorskiej było określenie przydatności cienkich warstw trójskładnikowego związku $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Sb}$ dla konstrukcji czujników Halla pracujących w „ekstremalnym” zakresie temperatur i odpornych na promieniowanie neutronowe. Wprawdzie domieszka Ga obniża wyraźnie ruchliwość nośników, to jednocześnie powinna wpłynąć na większą odporność i stabilność termiczną. Wyniki badań obejmujące próbki o parametrze x , określającym wkład Ga w ww. związku trójskładnikowym, z przedziału od 0,0 do 0,4 zostały ograniczone do badań stabilności termicznej, z przyczyn niezależnych od Doktoranta (przedłużająca się przerwa technologiczna reaktora Maria w Świerku). Z dyskusji uzyskanych wyników Doktorant wywnioskował, że dla parametru x równego lub większego od 0,2 niestety jakość warstw i odporność na cykle temperaturowe parametrów czujników (np. napięcia Halla i rezystancji) oraz zmiany koncentracji i typu przewodnictwa *de facto* dyskwalifikują te warstwy do konstrukcji czujników przeznaczonych do pracy w „ekstremalnych” temperaturach.

Praca doktorska zakończona jest ośmiostronicowym „Podsumowaniem”, które jest w moim odczuciu obszernym streszczeniem dyskusji wyników zawartej w Rozdziale 6. Moim zdaniem brakuje precyzyjnie sformułowanych wniosków obejmujących najważniejsze wyniki ilościowe, które określają parametry najlepszych czy optymalnych czujników pola magnetycznego, pracujących w szerokim zakresie temperatur oraz w warunkach napromieniowania neutronami. Ostatni akapit w „Podsumowaniu”, obejmujący 7 linii, który spełnia rolę wniosków końcowych jest w moim odczuciu zbyt skromny i nie oddaje ogromu pracy Doktoranta, włożonej w realizację pracy doktorskiej.

Spis odnośników literaturowych, co do zakresu i wyboru poszczególnych pozycji, nie budzi generalnie moich zastrzeżeń poza jednym faktem, że zawiera aż 8 odnośników do stron internetowych, które trudno uznać za udokumentowane źródła naukowe. Szczególnie dotyczy to głównych stron producentów czy firm handlowych, z których nie wynika wprost potwierdzenie tez zawartych w tekście pracy, np. dokumentujących stosowanie takich czy innych czujników pola magnetycznego przez te firmy.

Strona redakcyjna pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jednak Doktorant nie ustrzegł się kilku błędów merytorycznych, gramatycznych czy literowych lub niepotrzebnie stosował anglicyzmy. Przykładowo, Doktorant podał błędną datę skonstruowania pierwszego tranzystora (1956 r.?) oraz błędnie nazwisko jednego z wynalazców (Brattin?). Nie ma potrzeby stosowania określenia „whiskers”, ponieważ istnieją w języku polskim słowa „wiskers” lub „kryształy nitkowe.

Inne przykłady błędów stylistyczno-gramatycznych: „... wykorzystano napylarkę wykorzystującą ...” (str. 71), „Próbki oparte o cienkie warstwy InSb były częściowo przed zabiegiem fotolitografii a częściowo po tym procesie ...” (str. 77). W opisie legendy na Rys. 5.1 brak wyjaśnienia co oznaczają symbole „17” i „57”. Doktorant zbyt często używa nieprecyzyjne określenia np. „odpowiednio” w odniesieniu do składu roztworu trawiącego (str. 81) czy proporcji materiałów zapewniającej „wytworzenie bardzo trwałej spoiny” (str. 84), w innym miejscu (str. 88) napisał „parametr ten czasami zmieniał się nieznacznie, czasami trochę malał”. Na stronie 118 Doktorant użył sformułowania: „Powstały wówczas związek potrójny (InGaSb) charakteryzuje się identyczną budową chemiczną w porównaniu do InSb” – co miał na myśli?

Wszystkie powyższe krytyczne uwagi szczegółowe nie zmieniają mojej pozytywnej, ze względu na zawartość merytoryczną, oceny pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Jankowskiego.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymogi ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych – wykazuje wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca zawiera oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, jest napisana jasno, a treści w niej zawarte wskazują, że Autor jest bardzo dobrym eksperymentatorem, który opanował skomplikowaną technologię wytwarzania czujników pola magnetycznego, zaprojektował i skonstruował układ próżniowy do wytwarzania cienkich warstw InGaSb oraz potrafi przeprowadzić wnikliwą dyskusję własnych wyników eksperymentalnych w kontekście doniesień innych badaczy.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Jakuba Jankowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej przed Radą Wydziału Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej w Poznaniu.



Ryszard Czajka