

## Streszczenie

Spintronika jest młodą dziedziną fizyki, której rozwój związany jest z potencjalnymi zastosowaniami w kilku technologiach. Jej postęp został zainicjowany poprzez odkrycie zjawiska gigantycznego magnetooporu. Główną ideą jest wykorzystanie własności elektronu, jaką jest spin oraz manipulacja prądem spolaryzowanym spinowo. Uwzględnienie spinowego stopnia swobody pozwala definiować i przewidywać nowe efekty oraz funkcjonalności. Generowanie prądów spinowo spolaryzowanych jest możliwe poprzez wykorzystanie oddziaływania spinu na właściwości transportowe elektronów. Ewolucja spintroniki, poczynając od efektu GMR, eksponowała inne zjawiska związane z kontrolą i manipulowaniem prądem spolaryzowanym spinowo.

Macierzystym półprzewodnikiem w wykorzystywanych podczas badań strukturach był azotek galu (GaN). Jest on, obok krzemu (Si), jednym z ważniejszych materiałów wykorzystywanych w elektronice. Dzięki unikalnym właściwościom podzespoły elektroniczne wysokiej mocy i bardzo wysokiej częstotliwości zbudowane z materiałów azotkowych zdominowały obecnie rynek materiałów półprzewodnikowych.

W przedłożonej pracy dominują dwa główne wątki tematyczne związane z poszukiwaniami funkcjonalności spintronicznych w dwóch pokrewnych, ale jednak istotnie różniących się materiałach. Oba materiały zalicza się do rodziny tzw. rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych i zostały otrzymane na bazie azotku galu. Materiały z tej rodziny łączą w sobie właściwości magnetyczne i półprzewodnikowe.

Pierwszym badanym półprzewodnikiem magnetycznym jest strukturalnie i magnetycznie jednorodny (Ga,Mn)N. Związek ten w bardzo niskich temperaturach, poniżej 10 K, przy koncentracjach Mn wynoszących kilka procent, przechodzi do fazy ferromagnetycznej. Oczekiwano, że po wbudowaniu w strukturę GaN:Si/(Ga,Mn)N/GaN transmisja elektronów o zadanym kierunku spinu pomiędzy przewodzącymi okładkami GaN:Si będzie regulowana wartością rozszczepienia wymiennego pasma przewodnictwa w (Ga,Mn)N. Prace badawcze rozpoczęto od struktur otrzymanych na podłożach szafirowych i w ich toku wykazano, że tak przygotowane struktury nie wykazują efektów tunelowych. Przewodnictwo przez takie struktury jest silnie zwierane elektrycznie przez przewodzące dyslokacje przenikające, których ilość ze względu na duże

niedopasowanie sieciowe szafir – GaN może przewyższać  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . Podjęto szereg prób zniwelowania tego problemu. Jednym z zastosowanych rozwiązań było zmniejszanie rozmiarów mezy zawierającej strukturę tunelową. Zanim jednak osiągnięto zadowalający postęp napotkano barierę w postaci wykonania stabilnego i omowego kontaktu do mezy o średnicach poniżej kilkudziesięciu mikrometrów. W ostatnim podejściu wykorzystującym struktury otrzymywane na szafirze spróbowano zaadoptować zaawansowaną technikę litograficzną do wykonania tzw. mostków powietrznych. Technika ta umożliwia osadzenie kontaktu elektrycznego na mezach o rozmiarach pojedynczych mikronów. Niestety, pomimo ogromnego wysiłku włożonego w prace technologiczne otrzymywane mostki powietrzne okazały się niestabilne mechanicznie.

W ostatniej próbie neutralizacji dyslokacji przenikających wykorzystano warstwy (Ga,Mn)N osadzone na specjalnie buforowanych podłożach szafirowych, charakteryzujących się zredukowaną gęstością powierzchniową tych dyslokacji. Opracowano nową technikę otwierania okienek kontaktowych do materiału roboczego i po dopracowaniu procesu technologicznego (warunków wzrostu izolującej elektrycznie warstwy ALD i parametrów procesu lift-off) otrzymano strukturę w której możliwe było osadzenie stabilnego kontaktu elektrycznego do powierzchni (Ga,Mn)N o rozmiarach 50 mikrometrów. Metoda ta okazała się bardzo skuteczna. W jednym z tak przygotowanych okienek kontaktowych znalazła się tak mała ilość dyslokacji, że zaobserwowano tunelowy charakter przewodnictwa utworzonego złącza (Ga,Mn)N - Ti/Au. Fakt ten pozwolił po raz pierwszy wyznaczyć wartość bariery tunelowej Schottkiego dla złącza zawierającego (Ga,Mn)N. Podano również inne ważne charakterystyki tego złącza

Drugim materiałem intensywnie badanym w ramach mojego doktoratu był GaN domieszkowany żelazem. Specyficzną cechą GaN:Fe jest silna tendencja do formowania ferromagnetycznych wytrąceń nanokrystalicznych związków bogatych w Fe, które „dekorują” bazową matrycę GaN. W tym sensie GaN:Fe z licznymi wydzieleniami nanokrystalicznymi zalicza się do klasy kompozytowych rozcieńczonych półprzewodników magnetycznych. Nanokryształy uformowane w GaN:Fe charakteryzują się silnymi właściwościami magnetycznymi, głównie ferromagnetycznymi, a nanokryształy badane w tej pracy wykazywały dodatkowo silną anizotropię magnetyczną i były jednorodnie zorientowane prostopadle do płaszczyzny struktury. Mając dostęp do tak unikalnego materiału badawczego postanowiono wykorzystać odwrotny efekt piezoelektryczny w GaN. Postanowiono sprawdzić czy można wpłynąć na anizotropię magnetyczną obecnych w strukturze GaN

nanokryształów poprzez przykładanie zewnętrznego pola elektrycznego i wywołaną nim przestrzenną modyfikacją wurcytowej sieci krystalicznej GaN. Przygotowano odpowiednie struktury z bramkami elektrycznymi na których wykonano dwie serie pomiarów. Najpierw były to bezpośrednie pomiary namagnesowania. Wykorzystano w nich opracowaną wcześniej modulacyjną technikę detekcji zmian namagnesowania próbek poddanych działaniu zewnętrznego pola elektrycznego. Mimo ogromnej czułości tej metody, nie udało się zarejestrować zmian które mogły świadczyć o istnieniu związku pomiędzy elektrycznym modulowaniem struktury GaN a właściwościami magnetycznymi zawartych w niej nanokryształów. W drugim podejściu wypróbowano metodę elektrycznej detekcji zmian właściwości magnetycznych nanokryształów wywołanych zmianami zewnętrznego pola magnetycznego i/lub pod wpływem przykładania zewnętrznego pola elektrycznego. Otrzymane wyniki pozwoliły stwierdzić, że takiego związku się nie obserwuje, a przynajmniej, że zmiany oporu wynikające z istnienia takiego sprzężenia są mniejsze niż 0.01% wartości mierzonego oporu. Podana tu wartość jest górną granicą wielkości tego efektu i wynika ona najprawdopodobniej z dwusondowej metody pomiaru oporu, która w czasie wykonywania tych prac badawczych była jedyną możliwą do zastosowania.

Początkowe rozdziały rozprawy skupiają się na informacjach literaturowych potrzebnych do ogólnego naświetlenia podjętej tematyki. Drugi rozdział zawiera podstawowy opis znanych funkcjonalności spintronicznych obserwowanych w magnetycznych układach wielowarstwowych. W trzecim omówione zostały cechy charakterystyczne badanych materiałów, ich struktura krystalograficzna, pasmowa oraz interesujące dla tej rozprawy ich właściwości. Informacje zawarte zostały w podrozdziałach odpowiednio dla GaN, GaN domieszkowanego jonami manganu oraz GaN domieszkowanego jonami żelaza. Czwarty rozdział zawiera opis wykorzystywanej aparatury pomiarowej, układów pomiarowych oraz szczegóły procesów służących wytworzeniu badanych struktur. Rozdział piąty rozprawy zawiera opis oraz analizę uzyskanych wyników eksperymentalnych. Rozprawę kończy krótkie podsumowanie rezultatów pracy.

3.07.2023 r.  
Kalbarczyk Karolina