

Optymalizacja wzrostu epitaksjalnego azotku niobu do zastosowań w elektronice nadprzewodzącej

Układy elektroniczne bazujące na krzemie osiągnęły wydajność umożliwiającą rozwój sztucznej inteligencji, uczenia maszynowego oraz obliczeń kwantowych, co otwiera nowe możliwości w automatyzacji, robotyce i tworzeniu inteligentnych systemów. Jednakże możliwości rozwoju elektroniki krzemowej są ograniczone ze względu na trudności związane z efektywnym odprowadzaniem ciepła z układów, co prowadzi do przegrzewania i ograniczenia dalszej miniaturyzacji. Alternatywą dla krzemu mogą stać się urządzenia oparte na materiałach nadprzewodzących. Inaczej niż w przypadku zwykłych materiałów, elektrony poruszające się w nadprzewodniku nie oddziałują z siecią krystaliczną powodując jej drgania, co jest tożsame z utratą energii w postaci ciepła. Zastosowanie w układach elektronicznych elementów nadprzewodzących pozwala na minimalizację strat energetycznych i efektywniejsze zarządzanie ciepłem. Jednakże procesy kwantowe, które stoją za pracą urządzeń nadprzewodzących, są bardzo wrażliwe na zakłócenia, co znacząco wpływa na ich działanie. Wymagają one ekstremalnie niskich temperatur rzędu 4.2K (-269°C) oraz wysokiej jakości materiałów, pozbawionych defektów strukturalnych.

Punktem wyjściowym dla wytworzenia elementów elektronicznych mogą być złącza Josephsona, które składają się z dwóch warstw nadprzewodnika oddzielonych cienką warstwą zwykłego (nienadprzewodzącego) materiału o grubości zaledwie kilku warstw atomowych. Jednym z głównych ograniczeń w rozwoju złącz Josephsona jest jakość strukturalna wynikająca z obecnie stosowanych materiałów i technik ich wytwarzania, co wpływa na ich wydajność oraz stabilność działania. Obiecującym materiałem jest azotek niobu (NbN), który staje się nadprzewodnikiem w temperaturze 17K i charakteryzuje się wysoką stabilnością chemiczną, co sprawia, że urządzenia oparte na tym materiale nie ulegają szybkiemu zużyciu podczas pracy. Dodatkowo, struktura krystaliczna azotku niobu jest podobna do struktury innych azotków, takich jak azotek galu (GaN) i aluminium (AlN), które są powszechnie stosowane w diodach LED oraz laserach, co umożliwia ich integrację z innymi technologiami półprzewodnikowymi.

W ramach niniejszego projektu zostanie zbadana możliwość uzyskania wysokiej jakości warstw azotku niobu (NbN) pozbawionych defektów strukturalnych oraz struktur złącz Josephsona opartych na NbN za pomocą epitaksji z wiązek molekularnych (ang. Molecular Beam Epitaxy, MBE). Technika ta pozwala na wytwarzanie materiałów z dokładnością do jednej warstwy atomowej, oraz zapewnia precyzyjną kontrolę nad składem chemicznym i grubościami warstw, przy jednoczesnym uniknięciu wbudowywania atomów zanieczyszczeń do struktury. Pierwszym zadaniem będzie zbadanie, jak dobór podłoża (materiału, na którym hodowane są warstwy epitaksjalne) oraz parametrów wzrostu MBE wpływają na jakość azotku niobu. Obecnie wytwarzane warstwy NbN o wysokiej temperaturze przejścia do stanu nadprzewodzącego zawierają w swojej strukturze zbliźniaczenia, które powstają wskutek formowania się ziaren NbN o nieco innej orientacji. W momencie zetknięcia się takich ziaren tworzy się granica, w której ułożenie atomów odbiega od idealnego. To zjawisko prowadzi do powstania chropowatej powierzchni NbN, co stanowi poważny problem przy próbach hodowania złącz Josephsona z cienką barierą o grubości zaledwie kilku warstw atomowych. Wykorzystanie alternatywnych podłoży oraz kalibracja warunków wzrostu może umożliwić eliminację tych defektów z warstw azotku niobu.

W celu oceny jakości warstw zostanie wykorzystana transmisyjna mikroskopia elektronowa, pozwalająca na obrazowanie atomowej struktury materiałów. Pozwoli to jednocześnie na opisanie i lepsze zrozumienie mechanizmów wzrostu NbN oraz formowania się defektów. Kolejnym ważnym zadaniem w projekcie będzie wzrost cienkiej (~1 nm), ciągłej warstwy barierowej na powierzchni warstwy NbN, a następnie epitaksja kolejnej warstwy NbN, co pozwoli na wytworzenie złącz Josephsona. Wymaga to opracowania procedury przejścia od warunków wzrostu azotku niobu, do warunków wzrostu bariery, które nie będą degradować powierzchni NbN. Konieczne będzie również zbadanie jakie warunki wzrostu należy dobrać do uzyskania idealnych granic pomiędzy tymi warstwami.

Uzyskane w ramach projektu wyniki powinny pozwolić na zaproponowanie nowych rozwiązań materiałowych dla elektroniki opartej na złączach Josephsona. Ponadto, lepsze zrozumienie mechanizmów epitaksji NbN przy użyciu MBE otworzy nowe możliwości w zakresie wytwarzania złącz Josephsona o zmodyfikowanej strukturze, umożliwiając poprawę ich parametrów.