

## Heterostrukture tunelowe z azotku boru: innowacyjna platforma dla optoelektroniki

Materiały dwuwymiarowe (2D) cieszą się ostatnio dużym zainteresowaniem ze względu na ich intrygujące właściwości, które wynikają z faktu, że materiały te mają grubość zaledwie jednego atomu (lub kilku atomów). Ta nieprzekraczalna granica grubości daje początek wielu interesującym zjawiskom fizycznym, początkowo badanym w prototypowym materiale 2D, grafenie. Naukowcy szybko zdali sobie sprawę, że grafen nie jest jedynym materiałem 2D i wkrótce zaczęto eksperymentalnie badać wiele różnych materiałów. Materiały te mogą mieć bardzo różne właściwości, od metalicznych lub półprzewodnikowych po izolacyjne. Innym bardzo ważnym aspektem nieodłącznie związanym z materiałami 2D jest ich znacząca anizotropia: posiadają silne wiązania kowalencyjne w płaszczyźnie warstwy i słabe (van der Waalsa) pomiędzy warstwami. Właściwość ta eliminuje potrzebę dopasowania stałej sieci pomiędzy różnymi materiałami, umożliwiając układanie dowolnych materiałów 2D w celu zbudowania tak zwanych heterostruktur van der Waalsa (vdW). Duża i stale rosnąca lista dostępnych materiałów 2D może być zatem wykorzystywana do wytwarzania nowych struktur, które łączą różne właściwości, prowadząc do nowej klasy urządzeń.

W tym projekcie planujemy wykorzystać grafen i połączyć go z heksagonalnym azotkiem boru (h-BN), który jest izolatorem 2D. Heksagonalny azotek boru jest jednym z podstawowych elementów wielu heterostruktur vdW, zwykle służąc jako warstwa dielektryczna lub warstwa ochronna. Jednak oprócz tych istotnych i szeroko wykorzystywanych zastosowań, w dużej mierze pomijano fakt, że sam h-BN może również pełnić rolę aktywnego materiału w tego typu heterostrukturach. Niedawno raportowano elektroluminescencję (EL) z heterostruktur tunelowych grafen/h-BN/grafen, możliwej dzięki bezpośredniemu wstrzykiwaniu nośników ładunku do pasm przewodnictwa i walencyjnego h-BN. Ten nowy paradygmat kwantowego transferu nośników ładunku bezpośrednio do izolatora 2D bez potrzeby domieszkowania umożliwił obserwację elektrycznie wzbudzonej emisji (EL) w zakresie głębokiego UV (DUV). Dla tego technologicznie ważnego zakresu spektralnego (np. do dezynfekcji i odkażania) nie są obecnie dostępne wydajne półprzewodnikowe źródła światła. Wzbudzanie EL bez konieczności domieszkowania h-BN otwiera zupełnie nową dziedzinę badań, omijając wyzwania związane z efektywnym domieszkowaniem półprzewodników z szeroką przerwą energetyczną - jedną z głównych barier technologicznych utrudniających rozwój źródeł DUV opartych na różnych systemach materiałowych. Oprócz emisji w DUV, w heterostrukturach tunelowych z h-BN zaobserwowano również EL z defektów punktowych i centrów barwnych przy około 300 nm, 436 nm oraz w zakresie 500-600 nm. Pokazuje to, że EL z heterostruktur tunelowych z h-BN może obejmować szeroki zakres energii. Ten ostatni zakres widmowy jest szczególnie istotny, ponieważ zaobserwowano w nim optycznie wzbudzoną emisję pojedynczych fotonów związaną z centrami barwnymi, co wywołało znaczne zainteresowanie zastosowaniami h-BN związanymi z informacją kwantową.

Planujemy stworzyć zespół badawczy, który skupi się na heterostrukturach tunelowych vdW z BN jako elementem aktywnym. Tematyka ta jest rozwijana zaledwie od kilku lat, a w tym projekcie wprowadzamy kolejny innowacyjny aspekt: wykorzystanie epitaksjalnego BN. Aby to osiągnąć, zastosujemy metodę epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE) na 2-calowych podłożach szafirowych. Wzrost BN metodą MOVPE został wdrożony na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego ponad dekadę temu, umożliwiając wytwarzanie wysokiej jakości warstw. W przeciwieństwie do powszechnie stosowanej mechanicznej eksfoliacji płatków za pomocą taśmy klejącej, metoda ta pozwala nam wytworzyć warstwy BN o dużej powierzchni, dla których możemy nie tylko kontrolować grubość, ale także precyzyjnie dostroić proces wzrostu, aby manipulować gęstością defektów (np. związanych z węglem), składem poliotypowym i domieszkowaniem.

Jednym z ważnych celów projektu jest sterowanie koncentracją domieszek węglowych w celu zademonstrowania elektrycznie zasilanej emisji pojedynczych fotonów w h-BN. Cel ten będzie realizowany we współpracy z National University of Singapore (NUS). Oprócz badań EL, opracowane zostaną nowe rodzaje struktur, na przykład oparte na piezoelektrycznych, niecentrosymetrycznych poliotypach BN, które stają się gorącym światowym tematem badawczym.

Proponowany projekt skupi się zarówno na podstawowych procesach zachodzących w wytwarzanych heterostrukturach tunelowych, jak i na aspektach technicznych związanych ze wzrostem BN za pomocą MOVPE i w perspektywie wytwarzaniem urządzeń. Biorąc pod uwagę, że MOVPE jest dobrze ugruntowaną przemysłową metodą wzrostu, wyniki uzyskane w ramach projektu mogą znacząco wpłynąć na przejście od prototypowych urządzeń do skalowalnych nowatorskich zastosowań optoelektronicznych.