

Epitaksjalny Heksagonalny Azotek Boru: od Centrów Barwnych po Wielkopowierzchniowe Heterostrukture

W ostatnich latach heksagonalny azotek boru (hBN) ugruntował swoją pozycję wśród dwuwymiarowych materiałów jako niezastąpiony element ultracienkich heterostruktur. Ze względu na wysoką trwałość, szeroką przerwę pasmową i płaski interfejs bez tzw. wolnych wiązań, może on poprawiać własności i zapewniać ochronę innym kryształom van der Waalsa. hBN przyciągnął również wiele uwagi ze względu na jego potencjalne zastosowanie w rozwoju technologii kwantowych. Punktowe defekty w strukturze atomowej heksagonalnego azotku boru mogą być czynne optycznie. Emisja z takich centrów barwnych może być wysoce wrażliwa na lokalne warunki, takie jak naprężenia czy pole elektryczne i magnetyczne, czyniąc je obiecującymi kandydatami do budowy nanosensorów.

Niniejsza praca podejmuje temat zastosowań i właściwości hBN na dwóch skalach: makro i nano. W opisywanych badaniach wykorzystujemy wielkopowierzchniowy, ultracienki materiał wytworzony metodą Epitaksji z Fazy Gazowej ze Związków Metalooorganicznych (eng. MOVPE) do wytwarzania heterostruktur hBN z innymi materiałami 2D.

Rozdziały od 1 do 4 przedstawiają motywację, podstawy teoretyczne i przegląd badanych materiałów, a także metody ich wytwarzania i charakteryzacji. Rozdział 5 opisuje wykorzystane układy pomiarowe, a także opracowaną technikę transferu wielkopowierzchniowych warstw hBN, która jest kluczowa dla innych elementów pracy.

W rozdziale 6 przedstawiamy heteroepitaksjalną metodę wzrostu, mającą na celu wytwarzanie wielkopowierzchniowych monowarstw diselenku molibdenu (MoSe_2), przedstawiciela dwuwymiarowych półprzewodników, o wysokiej jakości optycznej. Przetestowaliśmy funkcjonalność epitaksjalnych warstw hBN jako podłoża, które poprawia jakość kolejno hodowanych monowarstw. Nasze badania obejmują dwa podejścia: wzrost MoSe_2 bezpośrednio na wyhodowanych metodą MOVPE warstwach hBN, a także na warstwach hBN transferowanych na inne podłoża. Badania morfologii, struktury i własności optycznych ujawniają wysoką jednorodność i powtarzalność wytworzonych próbek. Pomiar fotoluminescencji wykonany w niskich temperaturach wykazuje wysoką jakość optyczną hodowanych warstw MoSe_2 , przejawiającą się wąskimi i rozdzielonymi liniami ekscytonowymi. Transfer warstw hBN na podłoża krzem/dwutlenek krzemu pozwolił na elektryczne bramkowanie struktur i umożliwił kontrolę stosunku intensywności naładowanego do neutralnego ekscytonu MoSe_2 .

W rozdziale 7 przedstawiamy badania nad interakcjami w skali nano pomiędzy magnesami 2D i centrami barwnymi w epitaksjalnych warstwach hBN. Przedstawiamy schemat wytwarzania próbek i wyzwania związane z niską stabilnością heterostruktur. Badania optyczne pozwalają nam scharakteryzować defekty zwykle występujące w wyhodowanych warstwach epitaksjalnych. Pomiar spektroskopowy wykonany w szerokim zakresie temperatur zaowocował obserwacją zmiany energii emisji związanej z defektami w hBN skorelowaną z przejściem fazowym antyferromagnetyk-paramagnetyk w użytym dwuwymiarowym magnesie. Pomiar przeprowadzony w zewnętrznym polu magnetycznym wykazał intrygujący efekt zanikania i zmiany energii emisji z centrum barwnego w hBN zachodzący w polu magnetycznym odpowiadającym tak zwanemu przejściu spin-flop w magnesie 2D. W rozdziale dyskutujemy możliwe przyczyny obserwowanych zjawisk, wskazując na odkształcenia mechaniczne lub zmiany w lokalnym polu elektrycznym i magnetycznym. Badania heterostruktur hBN/magnes 2D są uzupełnione o wyniki spektroskopii optycznej przy pobudzaniu i detekcji z różnymi polaryzacjami światła. Przedstawiamy zależności katowe widm zebranych w zewnętrznych polach magnetycznych dla sygnałów Ramanowskich pochodzących od badanego magnesu 2D i emisji związanej z defektami hBN.

Rozprawa jest podsumowana w rozdziale 8, wskazując możliwości dalszego rozwoju i zastosowań przedstawionych badań.

Opisane wyniki pokazują, że hBN jest przyszłościowym materiałem, który można skalować i stosować w heterostrukturach i urządzeniach o rozmiarach makro. Jednocześnie hBN zapewnia doskonałą platformę do badania podstawowych zjawisk fizycznych w skali nano. Przedstawione wyniki dotyczące centrów kolorów w hBN i ich interakcji z magnesami 2D otwierają szeroką ścieżkę do zastosowań związanych z technologiami kwantowymi i nanosensorami, podczas gdy heteroepitaksjalny wzrost MoSe_2 na hBN ma potencjał na zwiększenie skali wytwarzania heterostruktur van der Waalsa.