

Streszczenie

Badania nad materiałami dwuwymiarowymi (2D) i heterostrukturami van der Waalsa są jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi fizyki. Dzieje się tak, ponieważ te materiały mogą stać się podstawą nowych, przełomowych technologii, ze szczególnym uwzględnieniem elektroniki nowej generacji. Głównym czynnikiem stymulującym szerokie zastosowanie urządzeń opartych na materiałach 2D jest wdrożenie technologii ich wytwarzania do masowej produkcji. Jedną z metod, która umożliwi skalowanie procesów wzrostu, jest chemiczne osadzanie z fazy gazowej (CVD, z ang. *chemical vapor deposition*). Kluczową rolę odgrywa tu wybór odpowiedniego podłoża do epitaksjalnego wzrostu. Ostatnie prace naukowe pokazują, że w zależności od użytego podłoża, charakter wzrostu oraz właściwości materiałów 2D wytworzonych metodą CVD istotnie się różnią, co utrudnia pracę nad ich praktycznymi zastosowaniami. Obecnie badania nad wpływem właściwości podłoża koncentrują się jedynie na pojedynczych układach warstwa-podłoże. Nie opublikowano, jak dotąd, bardziej systematycznych prac.

Celem niniejszej rozprawy było zbadanie w sposób kompleksowy korelacji między różnymi podłożami a charakterem wzrostu i właściwościami materiałów 2D oraz ich heterostruktur. W tym celu cztery materiały 2D (grafen, węgiel amorficzny, dwusiarczek molibdenu (MoS_2) i dwusiarczek wolframu (WS_2)) zostały zsyntezowane metodą CVD na różnych podłożach. W trakcie eksperymentów zbadano wpływ różnych cech podłoża (typ, skład chemiczny, orientacja krystalograficzna i przygotowanie powierzchni) na zarodkowanie, wzrost i właściwości fizyczne zsyntetyzowanych materiałów 2D przy użyciu szerokiego zestawu metod charakteryzacji.

Badania przeprowadzone w tej pracy wykazały, że wzrost i właściwości materiałów 2D zależą od wszystkich zbadanych cech podłoża. Szczególnie kontrola właściwości powierzchni podłoża ma ogromne znaczenie dla wzrostu wysokiej jakości materiałów 2D. Spośród najważniejszych wyników należy wskazać, że orientacja krystalograficzna germanu modyfikuje kształt zarodków grafenu i wpływa na poziom naprężeń w ciągłej warstwie, co jest tłumaczone przez wpływ rekonstrukcji powierzchni Ge. Ponadto zastosowanie podłoża dwuwymiarowych (grafen) zamiast trójwymiarowych (SiO_2 , szafir) skutkuje innym mechanizmem dyfuzji powierzchniowej, tj. dyfuzji mobilnej (ang. *mobile diffusion*), co poprawia stabilność syntezy MoS_2 . Dodatkowo efekt stabilizacji wzrostu MoS_2 i odporności na zmiany warunków termodynamicznych jest wzmacniany przez zastosowanie WS_2 jako podłoża

zamiast grafenu, co wynika ze zwiększonej adhezji między strukturalnie podobnymi materiałami 2D. Wreszcie, degradacja podłoży dwuwymiarowych skutkuje zwiększonym zarodkowaniem materiałów 2D, co może być wykorzystane w selektywnym wzroście warstw dla zastosowań elektronicznych.

Wnioski te zostały uzupełnione uogólnioną dyskusją na temat epitaksji klasycznej i van der Waalsa. Postuluje się, że wzrost materiałów 2D na podłożach 3D jest odrębnym modelem wzrostu, nazwanym epitaksją mieszaną (z ang. *mixed epitaxy*). Na koniec, na podstawie wyników eksperymentalnych, postawiono hipotezę, że wzrost materiałów 2D jest regulowany jedynie przez dwa czynniki: zewnętrzny (reprezentowany przez potencjał chemiczny) i wewnętrzny (wyrażony przez adhezję między warstwą a podłożem).

Przeprowadzone badania wskazują nie tylko na to, jak istotny jest wybór podłoża do wzrostu, ale także podkreślają konieczność skrupulatnej kontroli powierzchni podłoża. Nawet najmniejsze modyfikacje struktury i przygotowania powierzchni skutkują znaczącymi zmianami we właściwościach uzyskanych warstw, co jest dalece niepożądane w masowej produkcji urządzeń elektronicznych nowej generacji. Z tego względu niniejsza praca może być traktowana jako zbiór wskazówek przydatnych podczas wielkoskalowego wzrostu materiałów 2D i ich heterostruktur van der Waalsa dla zastosowań elektronicznych.

Słowa kluczowe: grafen; siarczek molibdenu; siarczek wolframu; węgiel amorficzny; materiały 2D; chemiczne osadzanie z fazy gazowej; epitaksja; epitaksja van der Waalsa; heterostrukture van der Waalsa; materiały elektroniczne