

Streszczenie

Pojawienie się nanotechnologii miało znaczący wpływ na nasze codzienne życie, jak i rozwój wielu dziedzin nauki. Rozwój technologii i badania naukowe dostarczają w tym zakresie coraz to nowych wyników i innowacji. Materiały występujące w rozmiarach nanoskopowych wykazują nowe właściwości nieobecne w ich makroskopowych wersjach. Dotyczy to unikalnych właściwości optycznych, elektrycznych, magnetycznych, termicznych i mechanicznych. Ich badanie jest niezwykle istotne z punktu widzenia praktycznych zastosowań. Jednakże, ich badanie pozostaje wciąż wyzwaniem eksperymentalnym, które napędza rozwój nowych technik pomiarowych.

Niniejsza rozprawa poświęcona jest właściwościom mechanicznym funkcjonalnych nanomateriałów o zróżnicowanych poziomach ograniczenia rozmiarów: cienkie powłoki nanokompozytowe, ultracienkie membrany i kryształy koloidalne. W pracy wykorzystano zjawisko rozpraszania światła Brillouina (*eng.* Brillouin light scattering – BLS) do zbadania wpływu parametrów takich jak stechiometria, nanoograczenie przestrzenne (efekt rozmiaru) lub warunki wysokiego ciśnienia na właściwości mechaniczne nanomateriałów.

W przypadku cienkich powłok z nanokompozytów, badano wpływ zawartości procentowej tantalum (Ta) na odpowiedź mechaniczną nanokompozytu 3D Ta-Hf-C nałożonego na krzem. Nanokompozyt ten składa się z krystalicznych nanocząstek otoczonych amorficznym, silnie grafitowym karbidem. Taka struktura daje wiele korzyści względem monokrystalicznych lub polikrystalicznych cienkich warstw, m.in. poprawienie właściwości mechanicznych, termicznych i elektrycznych. Ta-Hf-C jest materiałem wybitnie ogniotrwałym o jednej z najwyższych znanej człowiekowi temperatur topnienia ($> 3900\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ponadto, jego stabilność chemiczna i wysoka niereaktywność pozwalają na jego użycie jako warstwy chroniącej przed korozją w warunkach wysokotemperaturowych. W tej pracy moduł Younga Ta-Hf-C/Si z różną zawartością procentową tantalum określany był z użyciem metody elementów skończonych (*eng.* finite element method – FEM) na podstawie doświadczalnie zmierzonych zależności dyspersyjnych akustycznych fal powierzchniowych. Wyniki wykazały wyższy moduł Younga dla stopów trójskładnikowych $(\text{TaC})_x(\text{HfC})_y$ niż dla stopów dwuskładnikowych TaC i HfC. Co więcej, wyniki BLS wykazały zgodność z danymi uzyskanymi konwencjonalną metodą nanoindentacji.

Zależność własności mechanicznych membran 2D od ich rozmiaru jest zaprezentowany na przykładzie MoSe_2 , który jest reprezentantem grupy dichalkogenidów metali przejściowych. Wpływ ograniczenia rozmiarów do skali nanometrów na własności mechaniczne w tym przypadku wywołuje kontrowersje w środowisku naukowym. Do tej pory, nie ma niepodważalnego doświadczalnego dowodu na wpływ rozmiaru na własności mechaniczne w tym układzie. Zatem, nie jest jasne czy materiały van der Waalsa o kilku warstwach są bardziej czy mniej sztywne niż materiał objętościowy. W celu zbadania tego zagadnienia wykonano doświadczenia mikro-BLS dla MoSe_2 objętościowego i w postaci membran o różnej grubości. Główną zaletą zastosowanego podejścia eksperymentalnego jest możliwość jednoczesnego określenia parametrów takich jak: elastyczność, naprężenie reszkowe czy grubość kilku-warstwowych zawieszonych membran MoSe_2 . Wykazano anizotropię właściwości elastycznych, która do tej pory nie była opisywana w literaturze, zarówno dla materiału objętościowego jak i cienkich błon, mimo, że jest to szeroko badany materiał van der Waalsa. Co więcej, zaprezentowane wyniki doświadczalne wykazały około 30 % zmiękczenie MoSe_2 po zmniejszeniu grubości z materiału objętościowego do dwóch warstw. To odkrycie jest niezwykle istotne dla powiązanych obszarów badawczych, takich jak transport energii w nanoskali, elektronice czy rezonatorach wykorzystujących materiały van der Waalsa.

Ponadto w rozprawie zaprezentowano wzmocnienie mechaniczne trójwymiarowych kryształów koloidalnych polistyrenu za pomocą azotu i argonu w stanie nadkrytycznym. Metoda ta polega na wykorzystaniu współdziałania plastyfikacji powierzchni cząstek w nanoskali oraz nadciśnienia hydrostatycznego. Skutkuje ono tworzeniem trwałych fizycznych połączeń pomiędzy cząstkami przy zachowaniu ich kształtu i układu periodycznego kryształu koloidalnego. Proces ten nazywany jest zimnym spawaniem, gdyż zachodzi w temperaturach bliskich pokojowej. Rozpraszanie światła Brillouina zostało wykorzystane do badania *in situ* drgań mechanicznych kryształu, co pozwoliło określić optymalne warunki ciśnienia, temperatury i czasu trwania dla zimnego spawania.

Podsumowując, zbadano elastyczne właściwości nanomateriałów z różnymi strukturami przy użyciu rozpraszania światła Brillouina. Wyniki pokazują, że technika ta jest skutecznym narzędziem w określaniu mechanicznych właściwości różnych układów w nanoskali w sposób nieniszczący i bezdotykowy. Ponadto, metoda ta pozwoliła na zbadanie nieopisanych wcześniej

zjawisk zawartych w tej rozprawie, takich jak mechaniczne zmiękczenie dwuwymiarowych materiałów czy plastyfikację nanostruktur polimerowych pod wpływem wysokiego ciśnienia.