

Streszczenie

Azotek boru (BN) o hybrydyzacji sp^2 jest materiałem dwuwymiarowym (2D) o szerokiej przerwie energetycznej (~ 6 eV). Jego sieć krystaliczna może zawierać centra barwne emitujące w szerokim zakresie spektralnym - od bliskiej podczerwieni (NIR) aż po ultrafiolet (UV). Defekty te mogą być wykorzystywane w nowoczesnych technologiach kwantowych. W szczególności ujemnie naładowane luki borowe (V_B^-) służą jako ultraczułe kwantowe sensory pola magnetycznego, temperatury i ciśnienia. Z kolei defekty punktowe emitujące w zakresie widzialnym stanowią źródła pojedynczych fotonów wykorzystywane w bezpiecznej komunikacji kwantowej.

Większość badań dotyczących emiterów kwantowych w BN jest prowadzona z wykorzystaniem płatków o rozmiarach rzędu kilkudziesięciu μm^2 , eksfoliowanych z kryształów objętościowych. Takie podejście jest użyteczne do badania podstawowych właściwości centrów barwnych, ale ze względu na ograniczoną skalowalność i powtarzalność nie nadaje się do praktycznych zastosowań. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie epitaksji z fazy gazowej ze związków metaloorganicznych (ang. MOVPE), która pozwala na wytwarzanie wielkopowierzchniowych warstw BN na kilkucalowych podłożach.

Niniejsza praca podejmuje temat wytwarzania, charakteryzacji i inżynierii emiterów kwantowych w BN wytworzonym metodą MOVPE. Co istotne, centra barwne powstają samoistnie już podczas wzrostu materiału. Zakres badań obejmuje zarówno optymalizowanie tego procesu, jak i późniejszą modyfikację już istniejących defektów.

Pierwsze omawiane wyniki dotyczą optycznej charakteryzacji defektów punktowych w wysokiej jakości warstwach BN. Badany materiał zawiera liczne centra barwne emitujące w zielonym zakresie spektralnym, które wykazują emisję pojedynczych fotonów już w temperaturze pokojowej. Analiza statystyczna wskazuje na obecność co najmniej trzech rodzajów defektów emitujących w tym zakresie spektralnym, które mogą różnić się strukturą atomową bądź lokalną symetrią otoczenia. Omawiane emitery wykazują silne sprzężenie defektu z fononami pozapłaszczyznowymi (ang. out-of-plane). Następnym kluczowym zagadnieniem jest optymalizacja warunków wzrostu BN pod kątem generowania emiterów. Jednymi z wielu parametrów determinujących właściwości BN są grubość warstwy

oraz przepływ TEB, który wpływa na ilość boru i węgla dostępnych podczas wzrostu. Uzyskane wyniki pokazują, że większa grubość warstwy skutkuje większą stabilnością emiterów. Z kolei zbyt duży przepływ TEB podczas wzrostu prowadzi do pogorszenia czystości obserwowanej emisji. Co istotne, okazuje się, że przy stałych wartościach pozostałych parametrów koncentracja zielonych emiterów zależy wyłącznie od jednego efektywnego parametru łączącego grubość warstwy i przepływ TEB.

W dalszej części pracy badano wpływ bąbli wytwarzanych w epitaksjalnym BN poprzez naświetlanie elektronami na emisję z centrów barwnych. Okazuje się, że efekty interferencyjne pomiędzy materiałem tworzącym bąbel a podłożem mogą prowadzić do wielokrotnego wzmocnienia tejże emisji. Co istotne, samo naświetlanie elektronami nie skutkuje tworzeniem nowych emiterów ani modyfikowaniem już istniejących. Praktyczne zastosowanie tego zjawiska wymaga kontroli nad pozycją i wielkością wytwarzanych bąbli. Cel ten udało się osiągnąć poprzez zastosowanie wytworzonych litograficznie masek.

W ostatniej części pracy badano wpływ naświetlania neutronami termicznymi na emisję defektową w romboedrycznym azotku boru (rBN). Chociaż metoda ta jest powszechnie stosowana do wytwarzania centrów V_B^- w eksfoliowanych płatkach, w materiale epitaksjalnym domieszkowanym węglem prowadzi ona dodatkowo do generacji zielonych centrów barwnych. Wynik ten sugeruje istotną rolę kompleksów węgiel-luka w ich powstawaniu. Ponadto po raz pierwszy zaobserwowano indukowane neutronami formowanie centrów świecących w obszarze niebieskim. Do tej pory jedynym znanym mechanizmem tworzenia niebieskich emiterów było naświetlanie BN elektronami. Jeżeli przyszłe badania wykażą, że niebieskie centra generowane przy pomocy elektronów i neutronów odpowiadają temu samemu defektowi, aktualnie przyjęty model ich tworzenia, przypisujący kluczową rolę polu elektrycznemu wiązki elektronów, będzie wymagał rewizji.

Wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie znacząco poszerzają dotychczasową wiedzę na temat kwantowych emiterów w epitaksjalnym BN. Do najważniejszych osiągnięć należą określenie zależności między parametrami wzrostu a właściwościami centrów barwnych, zwiększenie intensywności ich emisji poprzez deterministyczne wytwarzanie bąbli w BN oraz identyfikacja nowych mechanizmów tworzenia zielonych i niebieskich emiterów w materiale domieszkowanym węglem z wykorzystaniem napromieniania neutronami. Uzyskane rezultaty stanowią istotny krok w kierunku kontrolowanego i skalowalnego wytwarzania kwantowych emiterów w BN oraz przybliżają perspektywę ich praktycznego wykorzystania.