

Defekty w ciałach stałych wciąż są głównym obszarem badań ze względu na ich potencjalne zastosowanie w zaawansowanych technologiach, takich jak komputery kwantowe, sensory czy źródła światła. Szczególnie obiecującą grupą materiałów do tych celów są półprzewodniki dwuwymiarowe (2D), które mogą być rozdzielone na niezwykle cienkie warstwy — o grubości zaledwie jednego atomu — i mogą być układane warstwowo w bardziej złożone systemy typu „nano-LEGO”, znane jako heterostruktury van der Waalsa. Jednym z takich materiałów jest heksagonalny azotek boru (h-BN), który ma warstwową strukturę krystaliczną podobną do grafenu. Posiada on szeroką przerwę energetyczną rzędu 6 eV, co czyni go odpowiednim do emisji światła w zakresie głębokiego ultrafioletu (DUV). Może on również zawierać różnego rodzaju defekty, takie jak naładowane luki borowe (Vb-), oraz emitery pojedynczych fotonów (SPEs), zdolne do emisji dokładnie jednego fotonu na raz. Co ważne, h-BN potrafi emitować światło z tych defektów nawet w temperaturze pokojowej, co jest rzadkie i bardzo interesujące dla naukowców.

Kiedy w strukturze krystalicznej występują defekty, mogą one wprowadzać dodatkowe poziomy energetyczne w obrębie przerwy energetycznej. Te poziomy mogą umożliwiać emisję światła w określony sposób. Na przykład, dimer węglowy (C2) — para atomów węgla zastępująca sąsiadującą parę bor-azot — emituje światło przy około 4,1 eV, podczas gdy defekt Vb- może emitować światło w zakresie widzialnym, silnie zależne od jego stanu spinowego. Defekty te reagują również na swoje otoczenie, m. in. inne pobliskie atomy lub zewnętrzne pola magnetyczne. Dimer węglowy wykazuje przesunięcie swojej głównej linii emisyjnej w zależności od sposobu, w jaki warstwy materiału są ułożone.

Sposób, w jaki warstwy są ułożone w materiałach dwuwymiarowych, odgrywa kluczową rolę w nowym i szybko rozwijającym się obszarze badań zwanym twistroniką. Dziedzina ta bada jak niewielkie skręcenie jednej warstwy względem drugiej może zmieniać właściwości materiału. Zyskała ona dużą uwagę po zaskakujących odkryciach, takich jak nietypowe nadprzewodnictwo w skręconym grafenie czy jasna emisja światła ze skręconych warstw materiałów zwanych dichalkogenkami metali przejściowych (TMD). Ostatnio badacze zaczęli przyglądać się podobnym efektom w h-BN. Silna emisja światła zaobserwowana w eksperymentach katodoluminescencyjnych (CL) może być wynikiem wzmocnionej emisji z defektów lub uwięzienia cząstek zwanych ekscytonami — oba te efekty najprawdopodobniej są powodowane przez niewielkie zniekształcenia struktury krystalicznej wywołane przez skręcenie warstw, znane jako potencjał moiré.

W tym projekcie zamierzamy badać, jak skręcanie warstw azotku boru, hodowanych metodą metalorganicznego epitaksjalnego osadzania z fazy gazowej (MOVPE) na Wydziale Fizyki, wpływa na właściwości tego materiału, emisję światła z emiterów pojedynczych fotonów i defektów spinowych. W przeciwieństwie do innych grup, które używają płatków eksfoliowanych z komercyjnie hodowanych kryształów objętościowych — które mogą znacznie różnić się jakością i rozmiarem — nasze podejście pozwala nam precyzyjnie kontrolować grubość, typ ułożenia warstw oraz koncentrację defektów w kryształach. Dzięki temu uzyskujemy duże, jednorodne warstwy o średnicy do 2 cali, co czyni nasze próbki świetnymi kandydatami zarówno do dokładnych badań jak i zastosowań przemysłowych.

Nasz plan obejmuje szczegółowe badania warstw i defektów za pomocą różnych metod pomiarowych: optycznych, strukturalnych i elektrycznych. Należą do nich spektroskopia Ramana i fotoluminescencji (PL), które badają interakcję światła z materią, mikroskopia sił atomowych (AFM) oraz spektroskopia katodoluminescencyjna. Wytworzymy w tym celu specjalnie ułożone struktury warstwowe z kontrolowanym kątem skręcenia. Do tego celu wykorzystamy zarówno „suchą” jak i „moką” eksfoliację (z lub bez użycia ciekłego rozpuszczalnika) do oddzielenia warstw od podłoża, a także specjalnego układu do precyzyjnego transferu i obrotu płatków. Korzystamy również z systemu fotolitografii bezmaskowej, który pozwala nam „drukować” wzory na docelowym podłożu w celu modyfikacji struktur, np. przez dodanie przewodzących ścieżek lub wprowadzenie lokalnych naprężeń. Wstępne wyniki zmierzane na naszych próbkach już pokazują wyraźne zmiany emisji CL w okolicach 4 eV w zależności od kąta skręcenia, co potwierdza obecność efektu moiré podobnego do tego obserwowanego w kryształach objętościowych.

Główne cele naszego projektu to zrozumienie wpływu kąta skręcenia na emisję światła z różnych defektów oraz ulepszenie techniki wzrostu w celu lepszej kontroli właściwości tych defektów, obserwowane na przykładzie dimeru C2 oraz luki borowej Vb-. Podczas gdy wpływ typu ułożenia warstw na emisję z defektu węglowego jest już dobrze poznany, znacznie mniej wiadomo na temat jego wpływu na defekt Vb-, który jest również badany w innych projektach w naszej grupie. Zbadanie możliwości wzmocnienia lub dostrojenia sygnałów pochodzących z tych defektów byłoby dużym krokiem w kierunku stworzenia dużych, wysokiej jakości warstw do zastosowań w sensorach.