

Kontrola spójności optycznej w półprzewodnikach za pomocą pól elektrycznych i magnetycznych

Badania podstawowe, które proponujemy w ramach tego projektu OPUS, dotyczą oddziaływań światło-materia w ciele stałym i koncentrują się na **spójności optycznej w materiałach dwuwymiarowych (2D)**; poczynając od klasycznych studni kwantowych (QW), poprzez monowarstwy dichalkogenków metali przejściowych (TMD), aż po rozwijające się nowe materiały, takie jak warstwowe materiały magnetyczne.

Ekscytony są elementarnymi wzbudzeniami elektronicznymi w półprzewodnikach. Są to związane elektrony i dziury, których ruch względny jest korelowany przyciąganiem kulombowskim. Zwykle są one wzbudzone przez laser skupiony na powierzchni próbki. Czas życia ekscytonów jest krótki, waha się od piko- do mikrosekund, w zależności od materiału i typu nanostruktury. Rekombinacji promienistej ekscytonów towarzyszy emisja fotonów. Z tego powodu, w ciągu ostatnich 60 lat podstawowe właściwości ekscytonów były badane za pomocą spektroskopii optycznej. Te żywe i długotrwałe **studia nad optyką półprzewodników** wynikają z ich znaczenia w optoelektronice, stale wnikałej w nasze codzienne życie. Od dziesięcioleci wzrost epitaksjalny dostarcza nanostruktur, w których materiał o mniejszym paśmie wzbronionym jest otoczony materiałem o większym paśmie wzbronionym. Tak wbudowane trwałe studnie potencjału ograniczają ruch nośników ładunku w jednym, dwóch lub trzech wymiarach odpowiednio w tzw. studniach kwantowych, drutach i kropkach, a ich energie ulegają skwantowaniu.

Kwantowe ograniczenie ekscytonów, dalej zwane kwantowaniem, jest głównym narzędziem pozwalającym kontrolować dynamikę oddziaływania światło-materia w półprzewodnikach, gdzie cała przekrycia między funkcjami falowymi elektronu i dziury w dużym stopniu reguluje ich **czas radiacyjny T_1** . Innym istotnym zjawiskiem obserwowalnym w optyce ekscytonów jest ich **spójność optyczna**. W przypadku zbioru ekscytonów, opisuje ona zależność fazową w polu polaryzacji ekscytonów. Ta zależność fazowa, zainicjowana poprzez laser wzbudzający, zanika również dla pojedynczych ekscytonów poprzez wielorakie procesy rozfazowania, np. oddziaływaniom z drganiami sieci krystalicznej, czyli fononami. Pojedynczy ekscyton można traktować jako dwupoziomowy układ kwantowy, a jego spójność odzwierciedla superpozycję kwantową kubitu ekscytonowego, który charakteryzuje się **czasem rozfazowania T_2** .

Głównym celem naszego projektu jest kontrolowanie dynamiki spójności i sprzężeń ekscytonów w skalach pikosekundowych poprzez strojenie ich kwantowania. W epitaksji osiąga się to poprzez modulację składu materiału. W tym wypadku zatem struktura kwantowania jest ustalona przez projekt wzrostu. Ponadto, zazwyczaj występują niejednorodności składu stopu, a także wahania rozmiarów i kształtu potencjału w skali atomowej. Problemy te można przezwyciężyć używając tu proponowanych nowatorskich heterostruktur półprzewodnikowych, umożliwiających dynamiczną kontrolę kwantowania, pozwalających zmieniać wymiarowość od gazów elektronowych 2D i 1D do 0D, gdy tylko jeden ekscyton jest splątkowany. W nanoelektronice kwantowej potwierdzoną strategią zamykania pojedynczych elektronów, w tak zwanych elektrostatycznie zdefiniowanych kropkach kwantowych, jest wytwarzanie płaskich metalowych elektrod na dwuwymiarowym gazie elektronowym o wysokiej ruchliwości w niezmiennie czystej heterostrukturze GaAs/AlGaAs i kontrolowanie transportu w reżimie jednoelektronowym.

Ze względu na neutralność ładunkową, elektrostatyczne kwantowanie ekscytonów stanowi jeszcze większe wyzwanie. Zostało to niedawno osiągnięte poprzez wykorzystanie efektu Starka i wzmocnionych oddziaływań polaronowych (ekscyton w obecności nośników ładunku) w **bramkowanej monowarstwie MoSe₂** (D. Thureja *et al.* Nature **606**, 298 (2022)). Ten materiał gości ekscytony o wysokiej energii wiązania, około 200 meV. Mogą one zatem istnieć w silnych gradientach pola elektrycznego przekraczających $10^3 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-2}$, w przeciwnym razie prowadzących do rozpadu ekscytonów i ich jonizacji w standardowych półprzewodnikach, takich jak arsenek galu. Co więcej, po umieszczeniu w wysokiej jakości heksagonalnego azotku boru (hBN), nieporządek elektronowy działający na ekscytony w MoSe₂ może być w dużym stopniu wyeliminowany, uniemożliwiając ich lokalizację przestrzenną, tak więc umożliwiając daleko-zasięgową dyfuzję, tym samym umożliwiając kwantyzację ich pędu. Aby wygenerować silne gradienty pola elektrycznego w płaszczyźnie, należy wyposażyć heterostrukture hBN/MoSe₂/hBN w bramki na górnej i dolnej stronie heterostruktury. Obecnie można to osiągnąć za pomocą litografii elektronej i napyłania metali w połączeniu z technikami układania w stosy, w celu wytworzenia heterostruktur van der Waalsa.

Aby zademonstrować strojenie kwantowania ekscytonów i pojawienie się koherentnego sprzężenia między skwantowanymi poziomami ruchu, **wykorzystamy techniki koherentnej spektroskopii nieliniowej**. Zwiększenie czasów T_1 i T_2 zmieniając napięcie na bramkach będzie dowodem na pojawienie się kwantowania i przejścia od reżimu 2D do 1D. Podobnie, używając pojedynczych warstw CrSBr, będącym dwuwymiarowym magnetycznym materiałem van der Waalsa zawierającym ekscytony, zademonstrujemy zmienną przestrzenną konfigurację i kwantowanie ekscytonów poprzez zastosowanie wektorowych pól magnetycznych w zakresie zaledwie 1 Tesli. Ten ambitny projekt otwiera zatem dziedzinę kontroli spójności ekscytonów w przestrzajalnym kwantowaniu za pomocą pól elektrycznych i magnetycznych. Projekt będzie korzystał z mojej zaangażowanej współpracy z uznanymi na całym świecie ekspertami w tej dziedzinie: prof. Ataç Imamoglu w ETH Zurich, a także prof. Jonathan Finley i Nathan Wilson z WSI, TU Monachium.