

Plazmoniczne wzmocnienia w fizyce ekscytonów rydbergowskich

Elektron walencyjny w półprzewodniku może przejść do pasma przewodnictwa po absorpcji fotonu o dostatecznej energii. Po elektronie pozostaje dziura, traktowana jak dodatnio naładowana cząstka, a elektron staje się swobodny. Jeśli jednak energia fotonu będzie odrobinę niższa, to elektron nie uwolni się całkowicie, lecz będzie związany z dziurą przyciąganiem elektrostatycznym. Taka para elektron-dziura to tzw. ekscyton - twór o własnościach zbliżonych do atomu wodoru. Co ważne, podobnie jak w atomach, elektron znajduje się na orbicie, której numer określa główna liczba kwantowa n .

Koncepcja ekscytonu pochodzi z lat 30-tych XX wieku, ekscytony zaobserwowano w latach 50-tych i wydawałoby się, że już niczym nowym nas nie zaskoczą. Niespodziewanie jednak w 2014 roku w kryształach Cu_2O zaobserwowano ekscytony charakteryzujące się $n > 20$, podczas gdy typowo nie obserwuje się stanów o $n > 3$. Takie wysoko wzbudzone stany są znane w fizyce atomowej - to tzw. atomy rydbergowskie. Analogicznie powstała nazwa ekscytony rydbergowskie. Pytanie brzmi, do czego mogą być one użyteczne?

Wróćmy na chwilę do atomów; w najprostszym obrazie atomy mają „warstwy” - każdy kolejna orbita jest większa od poprzedniej, a jej średni promień jest proporcjonalny do n^2 . Z ekscytonami jest tak samo. Stany o $n > 20$ są gigantyczne - ich średnica sięga mikrometrów, co jest porównywalne z grubością włosa! Mamy zatem do czynienia z makroskopowym obiektem kwantowym - czymś kompletnie niespotykanym w ciele stałym.

By wytworzyć ekscyton, potrzebny jest foton. Potem ten ekscyton oddziałuje z innymi fotonami; w ten sposób możemy go wykryć i badać jego własności. Światło (fala elektromagnetyczna) ma wiele form - fale biegnące, stojące, prowadzone światłowodem... Jedną z tych form są tzw. plazmony powierzchniowe. Powstają one na styku metalu i dielektryka (którym jest Cu_2O) i składają się z fali elektromagnetycznej oraz kolektywnego zaburzenia swobodnych elektronów w metalu. Jeśli metal uformujemy w konkretny kształt (nanoantena), to wpłyniemy na powstające plazmony, które są uwiązane do powierzchni metalu. W ten sposób możemy manipulować polem elektromagnetycznym, które następnie wpływa na sąsiadujące z nanoantena ekscytony. Co istotne, plazmony są zazwyczaj dużo silniej skupione niż swobodne fale, lecz nadal pozostają obiektami dość makroskopowymi, obejmującymi miliony oscylujących elektronów. Z tego powodu fizyka plazmonów to głównie fizyka klasyczna, aczkolwiek pewne efekty kwantowe też są obserwowane.

Tutaj dochodzimy do kluczowego zagadnienia projektu: co się dzieje, gdy połączymy dwa duże obiekty z pogranicza fizyki klasycznej i kwantowej - plazmony i ekscytony rydbergowskie? Jak do tej pory nikt tego nie próbował. Znane są doświadczenia z „małymi” ekscytonami o $n < 4$ w różnych półprzewodnikach, a opis teoretyczny takich zagadnień opiera się o przybliżenie, że ekscyton to cząstka punktowa umieszczona w konkretnym miejscu obok nanoanteny. W przypadku dużego ekscytonu rydbergowskiego możemy mieć zupełnie odmienną sytuację, w której nanoantena jest mniejsza od ekscytonu! Mamy zatem niepowtarzalną możliwość zaprojektowania nanostruktury oddziałującej wyłącznie z jednym ekscytonem lub małą ich grupą. W ramach projektu badane będą różne aspekty oddziaływania plazmon-ekscyton, w tym efekty nieliniowe (wzmocnione przez silnie skupione pole plazmonów) i aspekty dynamiczne (wyjątkowo ciekawe w przypadku ekscytonów rydbergowskich, które charakteryzują się bardzo długim czasem życia, często dłuższym od czasu życia plazmonów).

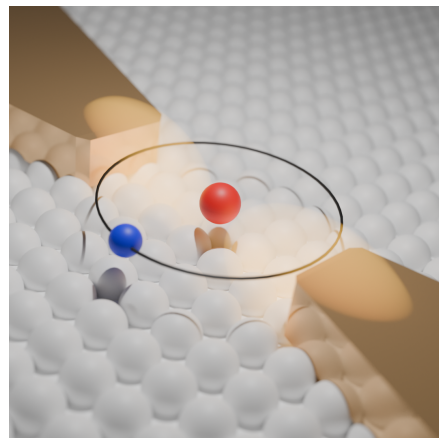


Figure 1: Schematyczne przedstawienie ekscytonu oddziałującego z nanoantena.