

Dynamika wzbudzeń ekscytonowych w kropkach kwantowych z pojedynczymi jonami magnetycznymi

Tomasz Smoleński, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Popularnonaukowy opis badań

Ciągły postęp w miniaturyzacji urządzeń półprzewodników (np. tranzystorów) może w niedługim czasie spowodować konieczność zastosowania pojedynczych jonów lub domieszek jako podstawowych nośników informacji. W związku z tym zrozumienie fundamentalnych własności tych obiektów oraz rozwinięcie technik pozwalających na intencjonalną kontrolę nad ich stanem kwantowym stanowi obecnie jedno z kluczowych zagadnień fizyki materii skondensowanej. Doprowadziło to do powstania nowej, bardzo dynamicznie rozwijającej się dziedziny badań i technologii – solotroniki, czyli optoelektroniki opartej na pojedynczych domieszkach. Niezwykle obiecującymi systemami solotronicznymi są, na przykład, centrum defektowe NV w diamencie dające się wykorzystać jako kubit pracujący w temperaturze pokojowej lub pojedyncza domieszka fosforu na powierzchni krzemu, która może zostać użyta jako jednoatomowy tranzystor. Bardzo interesującym systemem jest również półprzewodnikowa kropka kwantowa zawierająca pojedynczy jon metalu przejściowego. Jon ten oddziałuje wymienne z nośnikami ładunku uwięzionymi w kropce kwantowej, co pozwala na bezpośredni optyczny odczyt spinu jonu na podstawie energii i polaryzacji fotonów emitowanych z kropki. Dodatkowo, spin jonu można zorientować optycznie pobudzając kropkę spolaryzowanym kołowo światłem laserowym. W ten sposób kropka z pojedynczym jonem może zostać wykorzystana jako optycznie kontrolowana pamięć magnetyczna bliska ostatecznej granicy miniaturyzacji urządzeń przechowujących dane.

Do tej pory potencjał kropek z jonami wydawał się być jednak bardzo ograniczony. Uznawano bowiem, że dla znacznej większości systemów materiałowych obecność jonu magnetycznego wygasi luminescencję kropki, przez co skutecznie uniemożliwi jej badania optyczne. To przekonanie uzasadniane było wysoką efektywnością tego procesu w półprzewodnikach o szerokiej przerwie energetycznej, które domieszkowane były różnymi jonami metali przejściowych (np. żelaza lub kobaltu). Dlatego dotychczas badano jedynie dwa systemy kropek CdTe i InAs z pojedynczymi jonami Mn^{2+} , w których wygaszanie luminescencji było energetycznie zabronione. Wyniki badań doktorskich wnioskodawcy pokazały jednak, że efekt wygaszania luminescencji, nawet jeśli energetycznie dozwolony, jest całkowicie nieistotny w przypadku kropek zawierających dokładnie jeden jon magnetyczny. Zostało to bezpośrednio wykazane na podstawie pomiarów czasów życia ekscytonów w nowym systemie kropek kwantowych CdSe/ZnSe z pojedynczymi jonami Mn^{2+} . To odkrycie otworzyło nowe perspektywy badawcze, bowiem rozszerzyło domenę optycznych badań kropek kwantowych z pojedynczymi jonami metali przejściowych o dotychczas niewykorzystywane jony (takie jak żelazo) oraz związki półprzewodnikowe o szerokiej przerwie energetycznej. Badania takich nowych systemów kropek stanowią przedmiot studiów doktoranckich wnioskodawcy. Ich celem naukowym jest określenie własności spinowych jonów Mn^{2+} i Fe^{2+} w nowym systemie kropek CdSe/ZnSe. Równoległym celem badań jest także rozwinięcie technik pozwalających na odczyt i zapis informacji na spinie jonów w tych strukturach, a w szczególności określenie trwałości zapisu tej informacji.

Dotychczasowe badania przeprowadzone przez wnioskodawcę w ramach studiów doktoranckich pozwoliły zrealizować większość z zaplanowanych zadań. Przyniosły one również szereg niezwykle ciekawych wyników naukowych. W szczególności, opanowano technikę pozwalającą na manipulację spinem jonów Mn^{2+} i Fe^{2+} w kropkach CdSe. Co więcej, okazało się, że jon Mn^{2+} w kropce CdSe jest w stanie o ponad rząd wielkości dłużej przechowywać informację zapisaną na jego spinie, niż w przypadku poprzednio badanych kropek CdTe. Jednocześnie udało się pokazać, że, podobnie jak jon Mn^{2+} , tak i niebadany dotąd jon Fe^{2+} może zostać wykorzystany jako system do przechowywania informacji. Wynik ten jest o tyle nieoczywisty, że jon Fe^{2+} po wbudowaniu w typowy półprzewodnik staje się niemagnetyczny. Mówiąc precyzyjniej, jon ten posiada tylko jeden stan o najniższej energii, przez co jest on bezużyteczny z punktu widzenia informatyki kwantowej. Wnioskodawca wykazał, że pod wpływem bardzo silnego naprężenia kropki kwantowej następuje reorganizacja stanów elektronowych jonu Fe^{2+} , a w najniższej energii występują dwa możliwe stany spinowe, co umożliwi zastosowanie kropki z jonem Fe^{2+} jako pamięci magnetycznej. Wyniki tych badań zostały już w większości opublikowane, między innymi w postaci dwóch artykułów w renomowanym czasopiśmie *Nature Communications*, których wnioskodawca jest pierwszym, bądź jednym z dwóch równoważnych pierwszych autorów.