

Akustooptyka kwantowa nanoukładów hybrydowych

W dążeniu do miniaturyzacji urządzeń elektronicznych fizycy i inżynierowie poszukują coraz mniejszych układów fizycznych i struktur, które będą miały pożądane własności optyczne i elektroniczne. Jednym z takich układów jest półprzewodnikowa kropka kwantowa. Półprzewodniki są materiałami o uporządkowanej strukturze wewnętrznej, którym poprzez różne procesy fizyczne i chemiczne można nadawać różne, pożądane własności. Odgrywają one istotną rolę w prawie wszystkich dzisiejszych technologiach elektronicznych. Mają zastosowanie w odtwarzaczach Blue-Ray, komputerach, smartfonach, elektronice samochodowej i wielu innych miejscach w naszym codziennym życiu. Fizycy potrafią dziś otrzymywać struktury półprzewodnikowe o rozmiarach w zakresie kilku nanometrów, zwane właśnie kropkami kwantowymi. „Kropki”, ponieważ są to struktury bardzo małe: wielkość kropki kwantowej w stosunku do piłki futbolowej jest taka sama, jak wielkość tej piłki w stosunku do całego boiska piłkarskiego. Jak sama nazwa wskazuje, charakterystycznymi właściwościami tych struktur rządzą efekty kwantowe, a szczególnie falowa natura uwięzionych w niej elektronów, która jest jedną z podstawowych idei mechaniki kwantowej. Analogicznie do drgań struny gitary, mechanika kwantowa pozwala elektronom być w bardzo specyficznych stanach wibracyjnych, z którymi wiążą się określone wartości energii – poziomy energetyczne. Ten kwantowy charakter sprawia, że kropki kwantowe są bardzo podobne do zwykłych atomów, w których kwantyzacja energii doprowadziła do rozwoju teorii kwantowej, stąd też kropki kwantowe są często określane jako sztuczne atomy. Można pójść jeszcze dalej i poszukiwać struktur, które faktycznie mają wielkość podobną do atomów. Okazuje się, że takimi strukturami są niektóre punktowe defekty w strukturze ciał stałych, np. diamentu. Choć „defekt w diamencie” brzmi zniechęcająco (mimo że to one nadają polskowi diamentów piękne barwy), to okazuje się, że struktury te mają bardzo interesujący układ poziomów energetycznych i strukturę kwantowych przejść pomiędzy nimi, które można wykorzystać do tworzenia urządzeń w najmniejszej dostępnej dziś skali.

Próbując wykorzystać coraz mniejsze układy do przetwarzania informacji w sposób kwantowy, fizycy zorientowali się, że najczęściej nie wystarczy się ograniczyć do jednego zjawiska fizycznego i jednego nośnika informacji. W oczywisty sposób przekazywanie informacji musi się odbywać przy pomocy propagujących fal, tak jak ma to miejsce w codziennym życiu. Fundamentalne prawa fizyki mówią jednak, że długość takiej fali związana jest z jej częstotliwością, a ta z kolei z różnicą energii pomiędzy poziomami kwantowymi emitującego albo absorbującego tę falę układu. W przypadku wspomnianych defektów, ale też np. sztucznych atomów nadprzewodzących, te energie i częstotliwości są małe, a długości odpowiadających im fal elektromagnetycznych znajdują się w zakresie centymetrów. Nie da się ich zamknąć w strukturze mikrometrowej albo mniejszej, tworząc mikrorezonator, niezbędny do wzmocnienia i kontroli oddziaływania takiej fali ze sztucznym atomem. Istnieje rozwiązanie (stosowane zresztą w codziennej elektronice, np. w smartfonach): zamiast fal elektromagnetycznych należy użyć fal dźwiękowych. Prędkość dźwięku jest znacznie mniejsza niż prędkość światła, stąd fale dźwiękowe są dużo krótsze przy tych samych częstotliwościach. To rozwiązanie ma jednak pewne ograniczenie: nie istnieje w praktyce akustyczna komunikacja na duże odległości.

Tu dochodzimy do koncepcji układu hybrydowego, wykorzystującego np. dźwięk do komunikacji pomiędzy elementami układu kwantowego, a światło to przesyłania informacji na duże odległości. Chcielibyśmy, by odbywało się to bez utraty subtelnych kwantowych własności informacji. Potrzebujemy więc rezonatorów akustycznych, w których będziemy umieli utrzymywać kwantowe stany fal dźwiękowych. Potrzebujemy też układu, który pozwoli nam przetworzyć kwantową informację zapisaną w dźwięku do fal elektromagnetycznych, np. światła. Okazuje się, że zarówno kropki kwantowe, jak i defekty w kryształach mogą pełnić tę funkcję. Układy te nie tylko „widzą” określone kolory (reagują fizycznie na światło o określonej długości fali), ale też mogą one odczuwać lub „słyszeć” dźwięk. Słabe fale dźwiękowe wydają się nieistotne z punktu widzenia naszego makroskopowego świata, ale dla małych kropek kwantowych lub atomowych defektów diamentu są one jak trzęsienie ziemi. Układ drga tam i z powrotem, rozciąga się i ściska, a to modyfikuje kolor światła, które pochłania, emituje albo efektywnie rozprasza. Dlatego też wierzymy, że układy te są idealne do konstrukcji kwantowego przetwornika pomiędzy akustycznym, a optycznym nośnikiem informacji.

Zanim to się uda, musimy zrozumieć podstawowe, fizyczne prawa rządzące oddziaływaniem układów kwantowych jednocześnie ze światłem i dźwiękiem, a więc właśnie tytułowej akustooptyki kwantowej. W tym projekcie zastosujemy kombinację metod teoretycznych, aby opracować metody aktywnego wykorzystania drgań mechanicznych związanych z falą akustyczną. W naszych badaniach zajmiemy się powierzchniowymi falami akustycznymi oraz drganiami krystalicznych membran. Jeśli zastosowany ton zostanie precyzyjnie dobrany, jego właściwości mogą zostać przeniesione do stanu kwantowego fotonów emitowanych z kropki kwantowej lub defektu. Ten efekt konwersji własności akustycznych na optyczne można potencjalnie wykorzystać do kodowania informacji w polu świetlnym. Nasze badania będą więc stanowiły ważny krok w kierunku zastosowań ważnych dla codziennego życia.