

24.05.2025

Maciej Biały

Streszczenie

Postępujący rozwój technologii kwantowych związany jest z powstawaniem coraz to nowszych układów złożonych ze sprzężonych nanomateriałów. Jedynym z takich układów są układy Majorany, w których wykorzystywane są pojedyncze kropki kwantowe precyzyjnie umieszczone na końcach nanodrutu. Ze względu na wzajemne oddziaływanie nanomateriałów, konstruowane układy powinny być przygotowywane w sposób powtarzalny i dokładny, aby efekt sprzężenia przełożył się na funkcjonalność danego układu. Układy, w których obserwowany jest efekt sprzężenia pomiędzy dwoma lub większą ilością nanomateriałów nazywamy układem hybrydowym. W związku z obserwowanym efektem oddziaływania pomiędzy nanomateriałami opracowano szereg technik przestrzennej organizacji układów hybrydowych o kontrolowanej geometrii. Niedawno firma Microsoft zaprezentowała układ hybrydowy Majorana 1, który ma być wykorzystywany do konstrukcji komputerów kwantowych, co podkreśla rosnące znaczenie precyzyjnej kontroli ułożenia nanomateriałów w skali nanometrycznej.

Projektowanie i badanie układów hybrydowych jest przykładem badań interdyscyplinarnych. W eksperymentach wykorzystuje się wiedzę z zakresu chemii (modyfikacja powierzchni), fizyki (badanie oddziaływania pomiędzy nanomateriałami), nanotechnologii (synteza nanomateriałów) oraz mechaniki (kontrola położenia nanomateriałów w układzie hybrydowym). Połączenie wspomnianych dziedzin pozwala na konstrukcję układów hybrydowych i badanie dotąd nieznanych oddziaływań pomiędzy wybranymi nanomateriałami.

Wynikiem niniejszej pracy doktorskiej było opracowanie innowacyjnej techniki budowy układów hybrydowych o kontrolowanej geometrii składających się z nanodrutów srebra oraz kropek kwantowych. Za pomocą tej techniki w pierwszej kolejności zbudowano układ hybrydowy składający się z pojedynczego, przesuwanego nanodrutu srebra i kropek z kropek kwantowych różnym stężeniu. Wykorzystując techniki mikroskopii fluorescencyjnej potwierdzono możliwość zdalnego wzbudzenia różnie stężonych kropek z kropek kwantowych wykorzystując ten sam nanodrut srebra. Eksperyment ten wykazał również, że przesuwanie nanodrutu nie prowadzi do jego deformacji, ani uszkodzenia struktury. Kolejny układ hybrydowy składał się z długiego nanodrutu srebra oraz przesuwanej wzdłuż jego struktury kropli z kropkami kwantowymi. W trakcie eksperymentu za pomocą technik mikroskopii fluorescencyjnej zbadano długość propagacji polarytonów powierzchniowych w nanodrucie srebra w funkcji długości fali wzbudzenia. Konstrukcja układu hybrydowego pozwoliła na zbadanie długości propagacji polarytonów powierzchniowych bez konieczności osadzania

warstwy fluoroforu na metalicznej nanostrukturze. Precyzyjność i swoboda konstruowania układów hybrydowych pozwoliła na zbudowanie układu składającego się z dwóch odseparowanych na mikrometr nanodrutów srebra przysuniętych do tej samej kropli z kropek kwantowych. Ten układ hybrydowy stanowi pierwszą na świecie demonstrację transferu energii pomiędzy nanodrutami srebra na odległość powyżej jednego mikrometra, która została zarejestrowana za pomocą technik mikroskopii fluorescencyjnej.

Z punktu widzenia nanomateriałów wykorzystywanych do konstrukcji układów hybrydowych interesującym materiałem są nanodruty srebra, które pod wpływem światła wykazują wzbudzenia plazmonowe. Jest to spowodowane średnicą nanodrutów srebra będącą w granicy 100 nm. Ponadto ich długość, będąca w granicach kilkudziesięciu mikrometrów, pozwala na obserwowanie ich za pomocą techniki mikroskopii optycznej. Zaletą nanodrutów srebra, poza możliwością transferu energii na odległości mierzone w mikrometrach, jest również ich wytrzymałość mechaniczna, która pozwalała na swobodne przesuwanie nanodrutów srebra po powierzchni. Drugim nanomateriałem wykorzystywanym do konstrukcji układów hybrydowych są kropki kwantowe. Zmieniając średnicę rdzenia kropki kwantowej, można modyfikować wielkość przerwy energetycznej, co wpływa na obserwowaną długość fali emisji podczas wzbudzenia QD. Dzięki temu możliwy jest wybór kropek kwantowych, których długość fali emisji będzie dopasowana do rezonansu plazmonowego nanodrutów srebra. Tak dobrane właściwości optyczne obu nanomateriałów sprzyjają efektywnemu sprzężeniu i transferowi energii w układach hybrydowych.

Głównym celem pracy było zbadanie plazmonowego sprzężenia układów hybrydowych o kontrolowanej geometrii składających się z kropek kwantowych i nanodrutów srebra z wykorzystaniem technik optycznych. Kluczowym aspektem w kontekście badania sprzężenia w tych układach była powtarzalność wzajemnego ułożenia nanodrutów srebra i kropek z kropek kwantowych w pożądanych konfiguracjach. W ramach rozprawy doktorskiej opracowano również technikę osadzania pojedynczych kropek kwantowych w wybranych miejscach na powierzchni.

Praca składa się z trzynastu rozdziałów i została podzielona na dwie główne części: część teoretyczną oraz wyniki własne. W rozdziałach od pierwszego do szóstego przedstawiono podstawy teoretyczne związane z syntezą i właściwościami wykorzystywanych nanomateriałów oraz przykłady metod wytwarzania układów hybrydowych. W rozdziale pierwszym przedstawiono przykładowe nanomateriały wykorzystywane do konstrukcji układów hybrydowych oraz opisano metody syntezy i właściwości optyczne nanostruktur metalicznych oraz kropek kwantowych. Rozdział drugi opisuje wpływ nanostruktury metalicznej na właściwości optyczne sprzężonego z nim emitera. W rozdziale trzecim

przedstawiono właściwości optyczne nanodrutów srebra pozwalające na transfer energii wzdłuż struktury nanomateriału. Kolejny, czwarty rozdział obrazuje przykładowe metody tworzenia układów o kontrolowanej geometrii z wykorzystaniem szerokiej gamy nanomateriałów. W piątym rozdziale opisano aktualny stan wiedzy związany z przestrzenną organizacją nanodrutów srebra oraz osadzania pojedynczych emiterów. Ponadto przedstawiono efekt sprzężenia pomiędzy kropką kwantową i nanodrutem srebra. W szóstym rozdziale opisano materiały i techniki eksperymentalne wykorzystywane w trakcie badania konstruowanych układów hybrydowych składających się z nanodrutów srebra i kropek kwantowych.

Druga część pracy przedstawia wyniki własne, które zostały opisane w pozostałych siedmiu rozdziałach. W rozdziale siódmym przedstawiono cel rozprawy doktorskiej. W rozdziale ósmym opisano syntezę nanodrutów srebra, które były wykorzystane w eksperymentach. Rozdział dziewiąty poświęcony jest metodzie wykorzystywanej do przestrzennej organizacji nanodrutów srebra. W rozdziale dziesiątym opisano technikę osadzania kropek z kropek kwantowych w wybranych miejscach na powierzchni. Ponadto przedstawiono wpływ rozcieńczenia koloidu na ilość osadzanych kropek kwantowych. W rozdziale jedenastym przedstawiono właściwości optyczne skonstruowanego układu hybrydowego składającego się z pojedynczego, przesuwanego w trakcie eksperymentu, nanodrutu srebra sprzężonego do wielu kropek z kropek kwantowych. W kolejnym rozdziale zaprezentowano innowacyjny sposób bezinwazyjnego pomiaru długości propagacji w wybranym nanodrucie srebra z wykorzystaniem kropli z kropek kwantowych w zależności od długości fali lasera wzbudzającego. Trzynasty rozdział opisuje transfer energii w układzie hybrydowym składającym się z dwóch odseparowanych nanodrutów srebra sprzężonych do tej samej kropli z kropek kwantowych. Ostatni rozdział rozprawy doktorskiej jest podsumowaniem przedstawionych wyników. Zaprezentowano w nim najważniejsze rezultaty, które wskazują na możliwość wykorzystania przedstawionych metod do konstruowania nowych układów hybrydowych o kontrolowanej geometrii.

