

Złożona dynamika nieliniowych modów kondensatu polarytonów ekscytonowych

Streszczenie

Niniejsza rozprawa koncentruje się na opisie oraz możliwościach zastosowania nieliniowej dynamiki kondensatów polarytonów ekscytonowych.

Polarytony ekscytonowe (w skrócie, polarytony) to kwantowe kwazicząstki, będące koherentną superpozycją stanów fotonów i ekscytonów. Kwazicząstki te powstają w tak zwanym zakresie silnego sprzężenia kwantowego, które można obserwować w półprzewodnikowych mikrowętkach rezonansowych. Ze względu na swój hybrydowy charakter, polarytony łączą w sobie cechy zarówno światła, jak i materii.

Komponent fotonowy polarytonów zapewnia im bardzo niską masę efektywną, która może być nawet o cztery rzędy wielkości mniejsza od masy elektronów swobodnych. Komponent ekscytonowy współtworzący polaryton jest natomiast źródłem ich silnych oddziaływań. Polarytony są bozonami i ze względu na swoją niską masę efektywną mogą przechodzić do fazy makroskopowego, spójnego stanu kwantowego jak i do kondensatu bozonowego nawet w temperaturze pokojowej. Jednakże przez wzgląd na zanik komponentu fotonowego, spowodowany skończonym czasem życia fotonów w mikrowęcce rezonansowej, kondensat polarytonów ekscytonowych jest zwykle poza równowagą termodynamiczną. Kompensacja zanikających fotonów, np. przez zewnętrzne źródło optyczne, może prowadzić do ustalenia się trwałego, niezanikającego stanu kondensatu.

Unikalne właściwości kondensatów polarytonów ekscytonowych sprawiają, że są one doskonałą platformą do przyszłych zastosowań w zintegrowanej nanofotonice jak i do podstawowych badań nad nierównowagowymi układami koherentnymi. Ze względu na swoją nieliniową naturę kondensaty polarytonów ekscytonowych pozwalają na obserwację wielu efektów nieliniowych, do których zaliczamy oscylacje Josephsona, fale solitonowe czy też zjawisko bistabilności. Różnorodność zjawisk fizycznych obserwowanych w kondensatach polarytonów ekscytonowych, takich jak nadciekłość, nierównowagowe przejścia fazowe, koherencja dalekiego zasięgu i spontaniczna generacja nieliniowych wzbudzeń, była inspiracją do badań tych układów w ciągu ostatnich piętnastu lat.

Znaczna część badań poświęconych polarytonom dotyczyła ich zastosowania w układach nanofotonicznych, np. jako koherentnych emiterów światła lub symulatorów kwantowych. W naszych badaniach pokazaliśmy, że polarytony ekscytonowe można wykorzystać również do realizacji tak zwanych neuromorficznych układów obliczeniowych.

Poszukiwanie nowych systemów fizycznych, które umożliwią efektywne i energooszczędne przetwarzanie informacji, jest ważnym aspektem współczesnych badań wielu obszarów nauki. Należy zauważyć, że ograniczenia układów elektronicznych, które ujawniły się wraz z końcem stosowalności prawa Moore'a, stały się jednym z najważniejszych problemów informatyki. Zapewne najlepszym sposobem na rozwiązanie powstałego impasu technologicznego jest zastosowanie nowoczesnych metod obliczeniowych inspirowanych systemami biologicznymi, które wykraczają poza konwencjonalną architekturę obliczeniową. Warto również podkreślić, że jednym z najbardziej obiecujących sposobów utrzymania postępu technologicznego i realizacji tego typu układów obliczeniowych jest przetwarzanie informacji przy wykorzystaniu systemów optoelektronicznych.

Nasze badania wykazały, że sieć kondensatów polarytonów ekscytonowych jest unikalną platformą dla obliczeń neuromorficznych inspirowanych działaniem mózgu.

Andrzej Opole

W niniejszej pracy rozważono dwa główne tematy badawcze:

- *Teoretyczny opis nieliniowej dynamiki kondensatu polarytonu,*
- *Zastosowanie nieliniowej dynamiki polarytonów w realizacji neuromorficznych układów obliczeniowych.*

Pierwszy z tematów dotyczył dwóch problemów badawczych. Sformułowano teoretyczny model opisujący tzw. oscylacje relaksacyjne obserwowane w kondensatach polarytonów ekscytonowych. Ten typ nieliniowej dynamiki polarytonów wynika z procesów wielopoziomowej relaksacji wysokoenergetycznych nośników rozpraszających się do kondensatu. Zjawisko to może znaleźć zastosowanie w projektowaniu nowych koherentnych emiterów światła działających w sposób impulsowy.

Następnie zbadaliśmy dynamikę czasoprzestrzenną kondensatów polarytonów pompowanych w sposób nierezonansowy. Uzyskane wyniki pozwoliły określić ewolucję nieliniowych wzbudzeń generowanych w kondensacie. W tej pracy rozważaliśmy dynamikę ciemnych solitonów, które mogą w przyszłości zostać zastosowane w ultraszybkim przetwarzaniu informacji.

Drugie zadanie rozprawy dotyczy wykorzystania nieliniowej dynamiki polarytonów do projektowania układów obliczeniowych inspirowanych strukturą ludzkiego mózgu. Pokazaliśmy, że sieć sprzężonych kondensatów polarytonów ekscytonowych uwięzionych w mikrofilarach półprzewodnikowych jest efektywną platformą do realizacji tzw. obliczeń rezerwuarowych. Obliczenia rezerwuarowe to nowy trend realizacji obliczeń neuromorficznych. Przeprowadzone badania stały się podstawą do pierwszych eksperymentalnych realizacji polarytonowych sieci neuronowych.

Eksperymentalne realizacje polarytonowych sieci neuronowych były możliwe dzięki współpracy z włoską grupą doświadczalną prof. Daniele Sanvitto z CNR NANOTEC w Lecce oraz polską grupą doświadczalną prof. Barbary Piętki i prof. Jacka Szczytko z Uniwersytetu Warszawskiego.

Badania przedstawione w rozprawie miały charakter interdyscyplinarny, łącząc fizykę materii skondensowanej, optykę i współczesne podejście do uczenia maszynowego.

Badania przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w pięciu artykułach naukowych:

- *Dynamics of Defect-Induced Dark Solitons in an Exciton-Polariton Condensate,* A. Opala, M. Pieczarka, N. Bobrovska, M. Matuszewski, **Phys. Rev. B** 97: 155304, (2018),
- *Theory of Relaxation Oscillations in Exciton-Polariton Condensates,* A. Opala, M. Pieczarka, M. Matuszewski, **Phys. Rev. B** 98: 195312, (2018),
- *Neuromorphic Computing in Ginzburg-Landau Polariton-Lattice Systems,* A. Opala, S. Ghosh, T. C. H. Liew, M. Matuszewski, **Phys. Rev. Applied** 11: 064029, (2019),
- *Polaritonic Neuromorphic Computing Outperforms Linear Classifiers,* D. Ballarini, A. Gianfrate, R. Panico, A. Opala, S. Ghosh, L. Dominici, V. Ardizzone, M. De Giorgi, G. Lerario, G. Gigli, T. C. H. Liew, M. Matuszewski, D. Sanvitto, **Nano Lett.** 20: 3506, (2020),
- *Neuromorphic Binarized Polariton Networks,* R. Mirek, A. Opala, P. Comaron, M. Furman, M. Król, K. Tyszka, B. Seredyński, D. Ballarini, D. Sanvitto, T. C. H. Liew, W. Pacuski, J. Suffczyński, J. Szczytko, M. Matuszewski, B. Piętka, **Nano Lett.** 21: 3715, (2021).

Andrzej Opala
Andrzej Opala