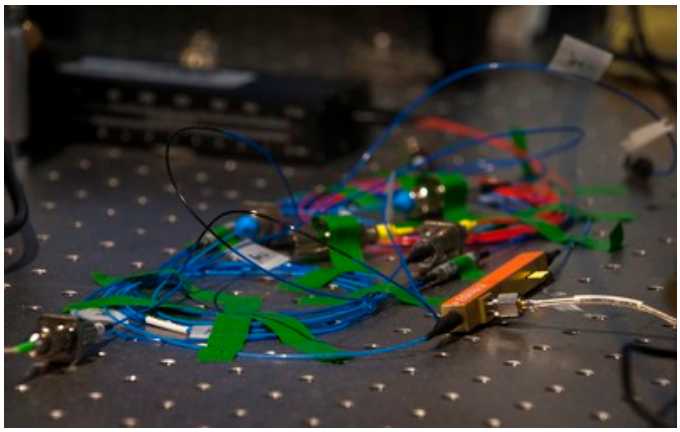
Fundament kwantowej telekomunikacji: Konwerter pojedynczych fotonów

2016-11-22



Konwerter pojedynczych fotonów (żółto-pomarańczowy prostopadłościan) wpięty w światłowody układu laboratoryjnego. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

Polsko-brytyjski zespół fizyków skonstruował i przetestował kompaktowy, wydajny konwerter, zdolny zmieniać cechy kwantowe pojedynczych fotonów. Nowe urządzenie powinno ułatwić budowę złożonych komputerów kwantowych, a w przyszłości może stać się ważnym elementem rozległych sieci – kwantowych następców dzisiejszego Internetu

Kwantowy internet oraz hybrydowe komputery kwantowe, zbudowane z podsystemów pracujących dzięki różnym zjawiskom fizycznym, przestają być mrzonką fantastów. Na łamach prestiżowego czasopisma „Nature Photonics" fizycy z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (FUW) i Uniwersytetu w Oksfordzie (UO) właśnie zaprezentowali kluczowy element takich systemów: elektrooptyczny przyrząd pozwalający w kontrolowany sposób modyfikować cechy pojedynczych fotonów. W przeciwieństwie do dotychczasowych, laboratoryjnych konstrukcji, nowe urządzenie pracuje z nieosiągalną dotychczas wydajnością, jest przy tym stabilne, niezawodne i kompaktowe.

Zbudowanie wydajnego przyrządu do kwantowego modyfikowania pojedynczych fotonów było zadaniem wyjątkowo trudnym z uwagi na fundamentalne różnice między informatyką klasyczną a kwantową.

Współczesna informatyka polega na przetwarzaniu grup bitów, z których każdy znajduje się w ściśle określonym, doskonale znanym stanie: jest równy albo 0, albo 1. Grupy takich bitów są ciągle przesyłane zarówno między różnymi podzespołami w ramach jednego komputera, jak też między różnymi komputerami w sieci. Obrazowo sytuację tę można porównać z przekazywaniem z miejsca na miejsce tacy z leżącymi na niej monetami, przy czym każda moneta jest skierowana ku górze albo reszką, albo

orzełkiem.

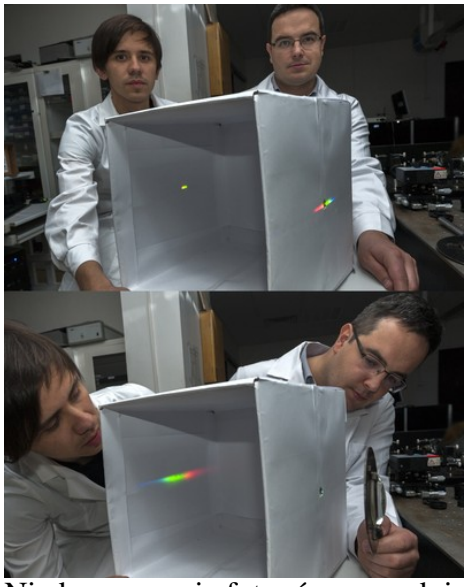
Pojedynczy foton w informatyce kwantowej przemieszcza się jak wirująca moneta – w superpozycji stanów. Modyfikowanie jego cech jest trudne, ponieważ zmianę trzeba przeprowadzić w wyrafinowany sposób, nie niszcząc superpozycji. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

W informatyce kwantowej sprawy się komplikują. Zjawiskiem leżącym u jej podstaw jest superpozycja stanów. Kwantowy bit – nazywany kubitem – jednocześnie znajduje się i w stanie 0, i w stanie 1. W ramach użytej przed chwilą analogii odpowiadałoby to sytuacji, gdy moneta wiruje na krawędzi. O kwantowym przetwarzaniu informacji można mówić tak długo, jak długo w trakcie wszystkich operacji udaje się utrzymać superpozycję stanów – a więc jak długo przy przekazywaniu tacy nie wytrąca się ze stanu wirowania żadnej monety.

„W ostatnich latach fizycy opanowali sztukę generowania impulsów świetlnych o konkretnej długości fali czy polaryzacji, składających się z pojedynczego kwantu – czyli wzbudzenia – pola elektromagnetycznego. Dziś potrafimy więc wytwarzać dokładnie takie kwantowe 'wirujące monety', jakie chcemy”, mówi dr Michał Karpiński z Instytutu Fizyki Doświadczalnej FUW, jeden ze współautorów publikacji. „Ale apetyt rośnie w miarę jedzenia! Skoro mamy już pojedyncze kwanty światła o zadanych cechach, fajnie byłoby móc z tymi cechami coś zrobić. Zadanie brzmi więc mniej więcej tak: masz wirującą srebrną monetę, prześlij ją z miejsca na miejsce, ale po drodze szybko i dokładnie zamień ją na złotą, naturalnie nie wytrącając jej z wirowania. Od razu widać, że problem wcale nie jest trywialny”.

Dotychczasowe metody modyfikowania pojedynczych fotonów korzystały ze zjawisk optyki nieliniowej. W praktyce sprowadzały się do prób wymuszania oddziaływania między pojedynczym fotonem a bardzo silną, pompującą wiązką światła. O tym, czy poddawany operacji foton zostanie zmodyfikowany, decydował czysty przypadek. Ponadto rozproszone światło wiązki pompującej mogło tu zanieczyścić strumień pojedynczych fotonów. Przy budowie nowego przyrządu grupa z FUW i UO postanowiła więc skorzystać z innego zjawiska fizycznego: efektu elektrooptycznego, występującego w niektórych kryształach. Pozwala on zmieniać współczynnik załamania światła w krysztale – tym silniej, im silniejsze jest przyłożone do niego zewnętrzne pole elektryczne (i bez wprowadzania jakichkolwiek dodatkowych fotonów!).

„To dość zaskakujące, że do modyfikowania cech kwantowych pojedynczych fotonów możemy z powodzeniem używać technik bardzo podobnych do stosowanych w standardowej telekomunikacji światłowodowej", komentuje dr Karpiński.



Niedopasowanie fotonów powoduje, że zwykle większa ich część nie daje się zapisać na przykład w pamięci kwantowej (tu zobrazowanej jako białe pudełko). Nowy konwerter pozwala na zmianę cech pojedynczych fotonów w taki sposób, że wszystkie fotony mogą się znaleźć wewnątrz pamięci. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

Za pomocą nowego urządzenia naukowcy – nie niszcząc superpozycji! – sześciokrotnie wydłużyli czas trwania impulsu jednofotonowego, co automatycznie wiązało się z zawężeniem jego widma, czyli spektrum kolorów. Szczególnie ważny jest tu fakt, że całą operację udało się zrealizować przy zachowaniu bardzo dużej wydajności. Dotychczasowe konwertery działały tylko w warunkach laboratoryjnych i były w stanie zmodyfikować zaledwie jeden foton na kilkadziesiąt. Tymczasem nowy przyrząd przy zachowaniu niskiego poziomu szumów pracuje z wydajnością przekraczającą 30%, większą nawet 200-krotnie w stosunku do niektórych dotychczasowych rozwiązań.

„W istocie przetwarzamy każdy foton wlatujący do kryształu. Wydajność nie jest stuprocentowa nie z uwagi na fizykę zjawiska, ale z powodu trudnych do uniknięcia strat o charakterze czysto technicznym, pojawiających się na przykład przy wprowadzaniu i wyprowadzaniu światła do i ze światłowodów”, wyjaśnia doktorant Michał Jachura (FUW).

Nowy konwerter jest nie tylko wydajny i niskoszumny, ale także stabilny i kompaktowy: urządzenie można zamknąć w pudełku o rozmiarach kilkunastocentymetrowych, łatwym do zainstalowania na światłowodzie przesyłającym pojedyncze fotony. Takie urządzenie pozwala realistycznie myśleć o budowie np. hybrydowego komputera kwantowego, którego poszczególne podzespoły przetwarzałyby informację kwantowo z użyciem różnych zjawisk fizycznych. Obecnie komputery kwantowe próbuje się budować z pułapkowanych jonów, spinów elektronowych w diamencie, kropek kwantowych, nadprzewodzących obwodów elektrycznych, czy ultrachłodnych chmur atomowych. Każdy taki układ oddziałuje ze światłem o innych właściwościach, co w praktyce oznaczało brak możliwości optycznego przekazywania informacji kwantowej między układami. Tymczasem nowy konwerter może wydajnie przekształcać jednofotonowe impulsy świetlne kompatybilne z jednym układem w impulsy kompatybilne z drugim. Przed naukowcami pojawia się więc realna droga do budowania sieci kwantowych, zarówno niewielkich, które mogą tworzyć pojedynczy komputer kwantowy (lub tylko jego podzespół), jak i rozległych, umożliwiających całkowicie bezpieczne przesyłanie danych między komputerami kwantowymi w różnych miejscach świata.

Część eksperymentalną badań zrealizowano na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Oksfordzkiego, w grupie badawczej kierowanej przez dr. Briana J. Smitha, gdzie dr Karpiński przebywał na stażu podoktorskim w ramach prestiżowego grantu europejskiego imienia Marii Skłodowskiej-Curie. Po stronie polskiej badania

sfinansowano z grantów Narodowego Centrum Nauki i 7. Programu Ramowego Unii Europejskiej.

Fizyka i astronomia na Uniwersytecie Warszawskim pojawiły się w 1816 roku w ramach ówczesnego Wydziału Filozofii. W roku 1825 powstało Obserwatorium Astronomiczne. Obecnie w skład Wydziału Fizyki UW wchodzą Instytuty: Fizyki Doświadczalnej, Fizyki Teoretycznej, Geofizyki, Katedra Metod Matematycznych oraz Obserwatorium Astronomiczne. Badania pokrywają niemal wszystkie dziedziny współczesnej fizyki, w skalach od kwantowej do kosmologicznej. Kadra naukowo-dydaktyczna Wydziału składa się z ok. 200 nauczycieli akademickich, wśród których jest 88 pracowników z tytułem profesora. Na Wydziale Fizyki UW studiuje ok. 1000 studentów i ponad 170 doktorantów.

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Bandwidth manipulation of quantum light by an electro-optic time lens"; M. Karpiński, M. Jachura, L. J. Wright, B. J. Smith; Nature Photonics 2016; DOI: 10.1038/nphoton.2016.228

KONTAKT:

dr **Michał Karpiński**
Instytut Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 22 5532740, +48 22 5548872
email: mkarp@fuw.edu.pl

mgr **Michał Jachura**
Instytut Fizyki Teoretycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego
tel. +48 22 5532969
email: michal.jachura@fuw.edu.pl

POWIĄZANE STRONY WWW:

http://www.fuw.edu.pl
Strona Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

http://optics.fuw.edu.pl/
Strona Zakładu Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

http://www.fuw.edu.pl/informacje-prasowe.html
Serwis prasowy Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

FUW161121b_fot01s.jpg HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW161121b_fot01.jpg
Pojedynczy foton w informatyce kwantowej przemieszcza się jak wirująca moneta – w superpozycji stanów. Modyfikowanie jego cech jest trudne, ponieważ zmianę trzeba przeprowadzić w wyrafinowany sposób, nie niszcząc superpozycji. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

FUW161121b_fot02s.jpg HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW161121b_fot02.jpg
Konwerter pojedynczych fotonów (żółto-pomarańczowy prostopadłościan) wpięty w światłowody układu laboratoryjnego. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

FUW161121b_fot03s.jpg HR: http://www.fuw.edu.pl/press/images/2016/FUW161121b_fot03.jpg
Niedopasowanie fotonów powoduje, że zwykle większa ich część nie daje się zapisać na przykład w pamięci kwantowej (tu zobrazowanej jako białe pudełko). Nowy konwerter pozwala na zmianę cech pojedynczych fotonów w taki sposób, że wszystkie fotony mogą się znaleźć wewnątrz pamięci. (Źródło: FUW, Grzegorz Krzyżewski)

FUW161121a - Konwerter pojedynczych fotonow.pdf (109.2 kB)