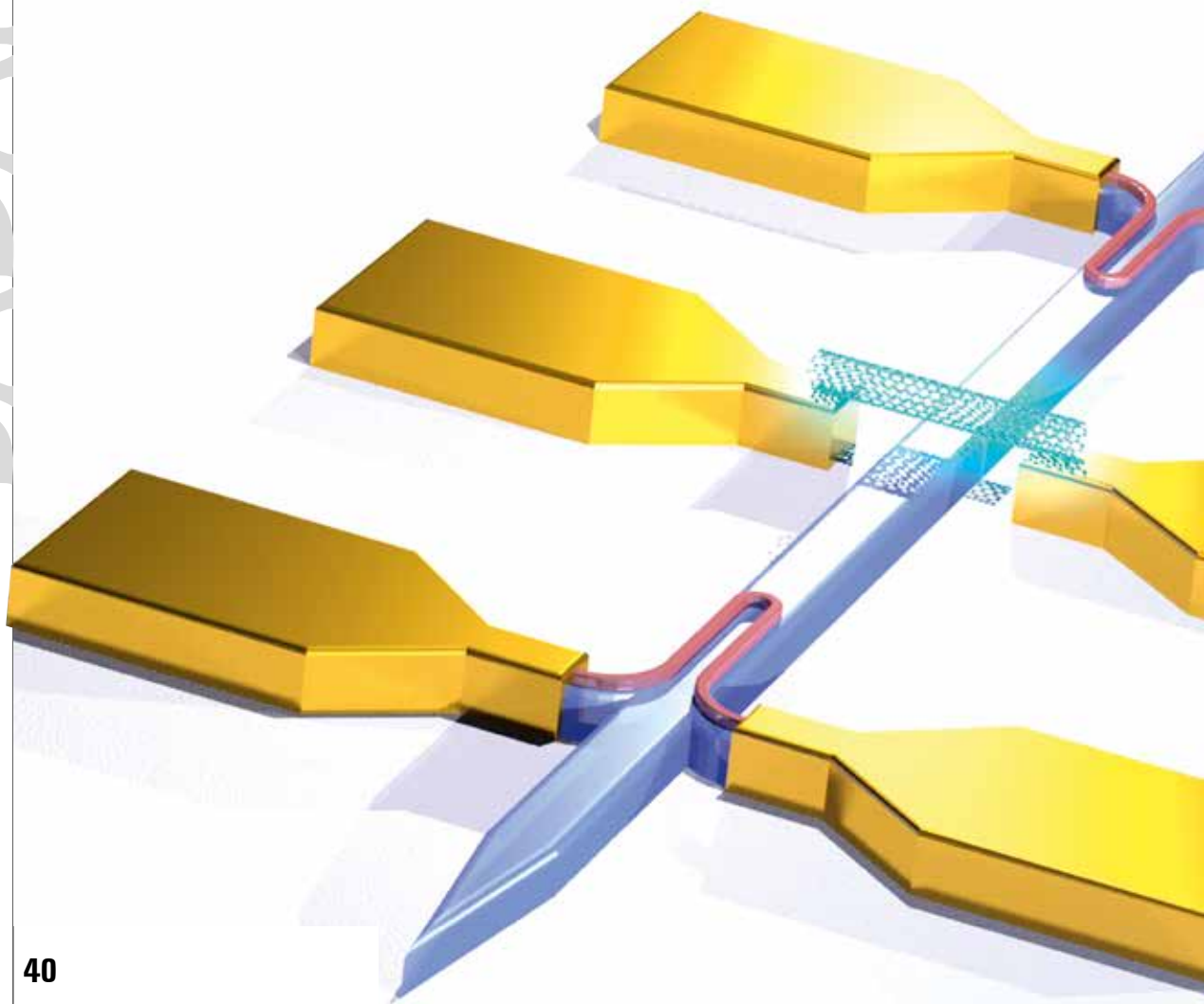


ACADEMIA fizyka

# ŚWIATEŁKO Z TUNELU

Wkrótce treść „Encyclopedia Britannica” będzie można zapisać na powierzchni mniejszej niż czubek szpilki – przekonywał w II połowie XX w. fizyk Richard Feynman. Ale pewnie i on byłby zdumiony tym, ile dziś potrafi setki tysięcy razy mniejsza od szpilki węglowa rurka. Jej właściwości znalazły zastosowanie m.in. w obwodzie scalonym, który powstał w Karlsruhe Institut für Technologie.



**dr Karolina Słowik**

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

**P**ierwsze komputery cyfrowe, które powstawały w latach 40. i 50. XX w., umożliwiały rozwiązywanie problemów, z którymi wcześniej ludzkość nie mogła się uporać. Różnorakie zagadnienia – od zastosowań militarnych, poprzez modelowanie układów fizykochemicznych i biologicznych, po zagadnienia makroekonomii – wymagały obliczeń zbyt skomplikowanych do wykonania za pomocą kartki i ołówka albo liczydła. Dziś stoimy u progu ery komputerów kwantowych. Oczekujemy, że nowe technologie okażą się miliony razy bardziej potężne niż rozwiązania dostępne obecnie. Ale by w pełni wykorzystać ich olbrzymi potencjał, musimy rozwiązać problem skalowania: nauczyć się budować obwody kwantowe zdolne do przetwarzania wystarczającej liczby kwantowych bitów.

## Nowa era kubitów

Operacje wykonywane przez komputery polegają na obróbce serii zer i jedynek, w których kodowana jest informacja w postaci przepływu lub braku przepływu prądu elektrycznego. Bity kwantowe, zwane kubitami (ang. q-bit – quantum bit), są znacznie bardziej pojemne: prawa fizyki kwantowej pozwalają im jednocześnie kodować wartości 0 i 1 (tzw. zasada superpozycji). To właśnie możliwość wykonywania jednoczesnych operacji na wszelkich możliwych wartościach danych stoi u podstaw oczekiwanej potęgi komputerów kwantowych.

Szacuje się, że maszyna zdolna do jednoczesnego przetwarzania 50 kubitów zdeklasuje mocą obliczeniową najpotężniejsze istniejące dziś superkomputery. Pozwoli to m.in. na wydajne modelowanie różnych procesów. Biologicznych, w tym projektowanie nowych leków poprzez symulacje ich oddziaływań z białkami. Chemicznych, np. uzyskanie bardzo dokładnych informacji o strukturze energetycznej cząsteczek. Meteorologicznych, np. modelowanie zmian klimatu. Oddziaływań międzycząsteczkowych, co pozwoli projektować zupełnie nowe materiały o wyższej wytrzymałości czy lepszej elastyczności. Wydajną analizę dużych zbiorów danych, w tym socjologicznych albo astronomicznych, poprzez tzw. uczenie maszynowe, gdzie komputery przeszukują bazy, by rozpoznać wzorce, z których istnienia mogliśmy nie zdawać sobie sprawy.

Nie dziwi więc, że koncerny takie jak Google, IBM, Microsoft czy D-Wave już wdrażają prototypowe technologie kwantowe. IBM stworzył kilkukubitową maszynę dostępną internetowo, na której każdy użytkownik może uruchomić własny kwantowy algorytm. Nadal jednak nie powstało prawdziwie skalowalne rozwiązanie technologiczne, pozwalające skoordynować obliczenia na dużej liczbie kubitów.

## Minirekord

Jednym z możliwych nośników kubitów jest polaryzacja pojedynczego fotonu: niepodzielnej cząstki promieniowania elektromagnetycznego, sygnału najsłabszego z możliwych. Działanie opartych na fotonach algorytmów kwantowych zostało niejednokrotnie potwierdzone w laboratoriach. Zwykle jednak doświadczenia te wykonywane są na ogromnych stołach optycznych, których wykorzystanie na skalę przemysłową nie wydaje się możliwe. Budowa kwantowego procesora wymaga małego źródła i detektora, które pozwalałyby emitować fotony bardzo szybko, a następnie je wykrywać. Tendencją jest zatem budowa układów scalonych dla światła, łączących te elementy na małych czipach. Miniaturyzacja niesie z sobą dodatkowe zalety. Mały rozmiar oznacza krótkie skale czasowe wykonywanych operacji, co ułatwia koordynację dużej liczby kubitów.



ANDRZEJ ROMANSKI

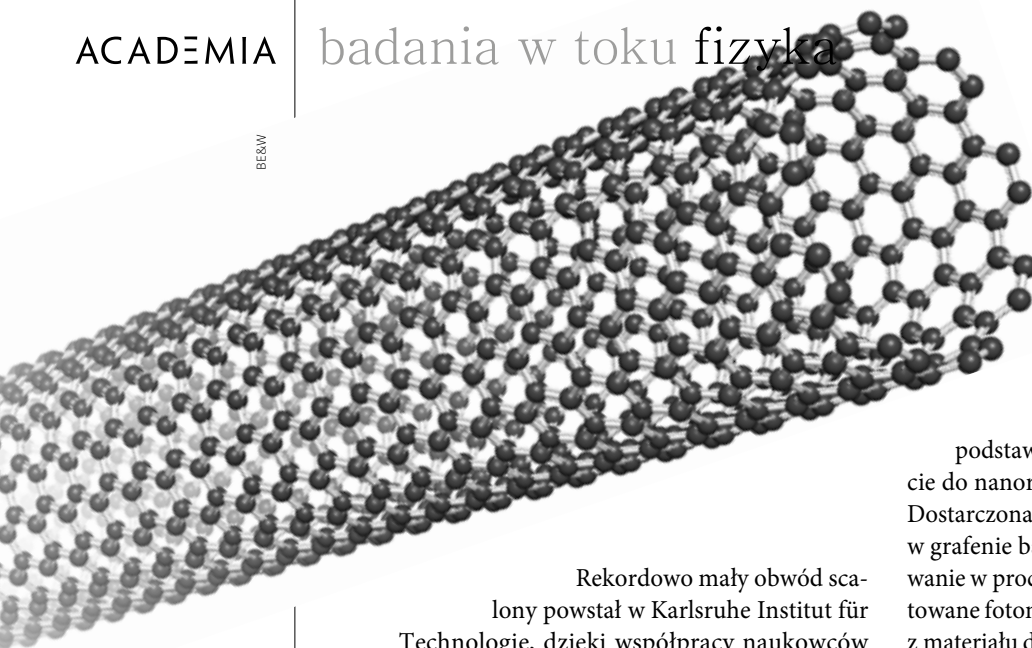
### Dr Karolina Słowik

jest adiunktem w Instytucie Fizyki Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UMK. Laureatka konkursu POLONEZ 1 Narodowego Centrum Nauki oraz konkursu HOMING Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Od 2016 r. realizuje wraz ze swoim zespołem projekt badawczy HEIMaT, finansowany przez FNP i dotyczący badania wpływu nanostruktur plazmonicznych na przejścia kwantowe w molekułach.

karolina@fizyka.umk.pl

Fot. 1

Schemat układu scalonego dla fotonów: położona centralnie nanorurka grafenowa spoczywa na złotych elektrodach doprowadzających napięcie. Pobudzana elektrycznie nanorurka emituje fotony, które propagują wzdłuż prostopadłe ustawionych światłowodów. Detekcja następuje w nadprzewodzących drucikach, które rozgrzane absorpcją fotonu przestają przewodzić prąd między złotymi złączami



Fot. 2  
Schemat nanorurki grafenowej, powstałej poprzez zwinięcie sieci atomów węgla o strukturze geometrycznej plastra miodu. Średnica rurki z ilustracji to około 2,5 nm, czyli czterystatysięczna część milimetra

Rekordowo mały obwód scalony powstał w Karlsruhe Institut für Technologie, dzięki współpracy naukowców z Niemiec, Rosji i Polski, pod kierownictwem profesora Wolframa Pernice'a. Składa się z trzech komponentów: nanorurek węglowych w roli źródeł światła, falowodu, który pozwala sterować drogą rozchodzenia się fotonów, oraz pary niezwykle czułych detektorów, wykrywających sygnały tak słabe, jak pojedyncze cząstki światła. Dodatkową zaletą obwodu jest jego elektryczne zasilanie, w odróżnieniu od zwykle stosowanej w laboratoriach metody laserowej. Dzięki temu nie ma potrzeby odfiltrowania silnej wiązki laserowej od słabego sygnału kwantowego. Cały chip zajmuje powierzchnię o rozmiarach ułamka milimetra. Wypracowana technologia pozwala na produkcję dziesiątek takich urządzeń w jednym cyklu.

## Węglowe gwiazdy

Nanorurki pełnią w obwodzie kluczową funkcję źródeł fotonów. Są zbudowane wyłącznie z węgla – pierwiastka, który występuje na naszej planecie w dużej obfitości, co przekłada się na względnie niewysokie koszty produkcji. Ich atrakcyjność z technologicznego punktu widzenia polega na tym, że dają się stosunkowo łatwo włączyć do istniejących metod produkcji układów scalonych, co wykorzystano w eksperymencie w Karlsruhe.

Nanorurki powstają poprzez zwinięcie w rulon grafenu, tj. pojedynczej warstwy grafitu, takiego jaki tworzy rysik ołówka. Jak sugeruje nazwa, są bardzo małe: mają średnicę około nanometra, sto tysięcy razy mniejszą niż przekrój ludzkiego włosa. Grafen nie jest materiałem izotropowym: jego właściwości, takie jak wytrzymałość albo przewodnictwo elektryczne, zależą od kierunku na grafenowej płaszczyźnie. Z tego względu, w zależności od kierunku zwijania warstwy grafenu, zmieniają się również właściwości optyczne nanorurek, takie jak kolor emitowanego przez nie światła. Błyskawiczny rozwój nanotechnologii w ciągu ostatnich kilkunastu lat zaowocował narodzinami technik nie tylko produkcji nanorurek na dużą skalę, ale również ich sortowania w zależności od geometrii.

Znaczy to, że możemy wyselekcjonować nanorurki świecące dokładnie w pożądanym kolorze lub w zadanym zakresie podczerwieni.

W doświadczeniu z Karlsruhe nanorurki wybranego rodzaju były precyzyjnie umieszczane na wykonanych ze złota elektrodach, zamocowanych uprzednio na szklanej podstawie chipa. Elektrody doprowadzały napięcie do nanorurki, wywołując w niej przepływ prądu. Dostarczona w ten sposób energia elektryczna ulegała w grafenie bardzo wydajnej zamianie na promieniowanie w procesie zwanym elektroluminescencją. Emitowane fotony były przechwytywane przez wykonane z materiału dielektrycznego światłowody, których rolą było doprowadzenie ich prosto do detektorów. Ich sygnał potwierdzał akt emisji i wykrycia światła.

Stworzenie detektorów wystarczająco czułych, by wykrywać sygnały tak słabe jak jeden tylko foton, jest samo w sobie osiągnięciem technologicznym. Wiele tego rodzaju urządzeń już istnieje i jest używanych w laboratoriach naukowych. W doświadczeniu wymagania stawiane detektorom były jednak szczególnie wysokie, ponieważ proces elektroluminescencji zachodzi w nanorurkach bardzo szybko. Czas potrzebny na zamianę energii elektrycznej na światło wynosił poniżej stu pikosekund, tj. krócej niż jednadziesiątymiliardowa część sekundy! Oznacza to, że od detektorów wymagano szczególnie wysokiej rozdzielczości czasowej, którą osiągnięto poprzez wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa w połączeniu z bardzo precyzyjną inżynierią geometrii światłowodu.

Nadprzewodnictwo to zjawisko, w którym prąd może płynąć przez druty praktycznie bez oporów. Zjawisko to wymaga ultraniskich temperatur i ustaje nagle po podgrzaniu drutu o ułamek stopnia Celsjusza. Działanie detektorów nadprzewodzących wymaga zatem schłodzenia układu ciekłym helem do temperatury 1,6 K, czyli około -271,5°C. Nawet w zimnej przestrzeni międzygwiazdowej panują wyższe temperatury! Przy pracy detektora przez tak ekstremalnie schłodzony drut płynie prąd nadprzewodnictwa. Gdy w pobliżu dociera foton, jego energia jest absorbowana, co rozgrzewa drucik i natychmiast odcina przepływ prądu. W ten sposób wykrywana jest obecność fotonu. Żeby proces detekcji zachodził z dużą wydajnością, potrzeba zwykle względnie długiego drutu: zwiększa to prawdopodobieństwo oddziaływania z fotonem. To jednak przekłada się bezpośrednio na wydłużenie czasu, jaki zabiera pojedynczy akt detekcji, a więc na zmniejszenie rozdzielczości czasowej urządzenia.

## Podwójne połączenie

Grupa z Karlsruhe wspólnie z kolegami z Moskiewskiego Uniwersytetu Pedagogicznego opracowała zatem

## ZINTEGROWANY KWANTOWY OBWÓD FOTONICZNY

technologię, w której drut nadprzewodzący przecina pod kątem prostym drogę fotonu. To mogłoby zmniejszyć prawdopodobieństwo detekcji ze względu na krótki czas oddziaływania z fotonem. Żeby temu zapobiec, po obu stronach drutu nadprzewodzącego wywiercono w światłowodzie rzędy dziurek o precyzyjnie dobranych rozmiarach. To zaskakujące, ale takie dziurki działają zupełnie jak lustro. Lustro z tyłu drutu odbijało fotony całkowicie, a lustro na przedzie było półprzezroczyste, tak by pozwolić fotonom na wejście, ale uniemożliwić wyjście z pułapki. Pozwoliło to uzyskać niemal doskonałą absorpcję przy dużej rozdzielczości czasowej detekcji. W ten sposób znaczna część światła emitowanego przez nanorurki mogła być wykryta.

Celem doświadczenia było jednak nie tylko pokazanie, że nanorurki mogą być źródłami promieniowania, ale przede wszystkim udowodnienie, że w procesie emisji produkowane są najczęściej pojedyncze fotony. Ma to kluczowe znaczenie dla obliczeń w kwantowych komputerach, a także dla komunikacji kwantowej i innych zastosowań kwantowo-optycznych. Z tego względu nanorurka połączona była światłowodami nie z jednym, ale z dwoma detektorami. Każdy wyemitowany foton, ze względu na swoją niepodzielną naturę, mógł być wykryty przez jeden tylko detektor, indukując w nim sygnał, tzw. kliknięcie. Gdyby generowane przez nanorurki impulsy składały się z większej liczby

fotonów, każdy z nich niezależnie trafiałby do jednego z dwóch światłowodów, co od czasu do czasu prowadziłoby do jednoczesnego kliknięcia obu detektorów, zwanego koincydencją. Analiza statystyczna liczby koincydencji w stosunku do całkowitej liczby kliknięć pozwoliła nam potwierdzić, że w przeprowadzonym doświadczeniu emisja ma w dużym stopniu jednofotonowy charakter.

Eksperyment stanowi milowy krok na drodze do budowy optycznych komputerów kwantowych. Udało się rozwiązać wiele problemów technologicznych i przełamać dotychczasowe schematy. Pozwala to rozwinąć skalowalną technologię produkcji rekordowo małych, elektrycznie zasilanych obwodów scalonych dla fotonów, opartą na łatwo dostępnych, szybkich źródłach i przełomowych rozwiązaniach w dziedzinie detekcji. Perspektywy dalszego rozwoju obejmują zawężenie gamy kolorów emitowanego światła, co będzie korzystne dla zastosowań obliczeniowych, wzbogacenie czipów o dodatkowe elementy optyczne oraz doświadczenia interferencyjne na coraz większej liczbie kodowanych w wygenerowanych fotonach kubitów. Droga ta zapewne znów będzie pełna wyzwań, które trzeba i warto pokonać, bo to zaprowadzi nas prosto w erę kwantowych technologii.

KAROLINA SŁOWIK

Chcesz wiedzieć więcej?

Khasminskaya, S., Pyatkov, F., Słowik, K., Ferrari, S., Kahl, O., Kovalyuk, V., Rath, P., Vetter, A., Hennrich, F., Kappes, M. M., Gol'tsman, G., Korneev, A., Rockstuhl, C., Krupke, R., Pernice, W. H. P. (2016). Fully integrated quantum photonic circuit with an electrically driven light source, *Nature Photonics* 10 (11), 727–732

Pyatkov, F., Fütterling, V., Khasminskaya, S., Flavel, B.S., Hennrich, F., Kappes, M. M., Krupke, R., Pernice, W. H. P. (2016). Cavity-enhanced light emission from electrically driven carbon nanotubes, *Nature Photonics* 10 (6), 420–427

Vetter, A., Ferrari, S., Rath, P., AlaeR., Kahl, O., Kovalyuk, V., Diewald, S., Goltsman, G. N., Korneev, A., Rockstuhl, C., Pernice, W. H. P. (2016). Cavity enhanced and ultrafast superconducting single-photon detectors, *Nano Letters*

REKLAMA



Śledź nas  
na  
Facebooku

Naukaonline.pl