



Nowe źródła pojedynczych fotonów dla kryptografii kwantowej

prof. dr inż. WOJCIECH NOWAKOWSKI, Instytut Maszyn Matematycznych, Warszawa

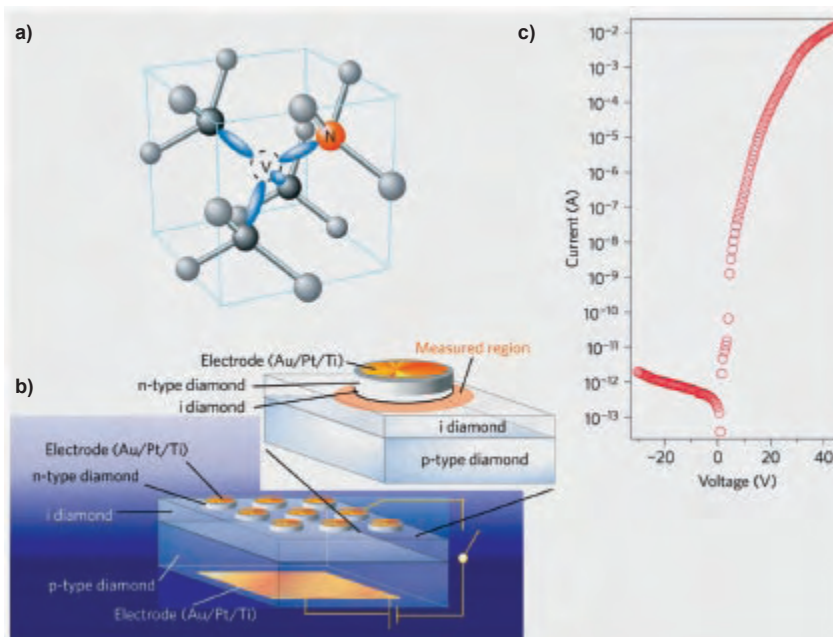
Kryptografia kwantowa teoretycznie jest bezpieczna, co wynika z samych praw mechaniki kwantowej [1, 2], ponieważ każda próba podsłuchania sygnału wprowadza zmiany tego sygnału, co informuje komunikujące się strony o ingerencji. W praktyce jednak współczesne, nawet komercyjne systemy kryptografii kwantowej są niedoskonałe, gdyż występuje wiele problemów implementacyjnych i technicznych [3]. Praktyczne wykorzystanie tej, teoretycznie doskonałej metody szyfrowania transmisji danych jest więc bardzo ograniczone, właściwie do urządzeń demonstracyjnych lub krótkich łączy specjalnie chronionych, np. na terenie jednej instytucji. Złośliwi twierdzą nawet, że kryptografia kwantowa do doskonały „temat wieczny”, bo bardzo nośny i nowoczesny, ale od lat nie przynoszący żadnych realnych korzyści.

Główne problemy to tanie i efektywne źródło strumienia pojedynczych fotonów o dostatecznej energii oraz ich poprawna technicznie, skuteczna detekcja. Wykazano np. [3], że po stronie detekcji sygnału łatwo jest oślepić fotopowielacz i stworzyć tym samym warunki niedostrzegalnego podsłuchu. Z problemem generacji fotonów jest jeszcze gorzej. Nie mamy dobrych źródeł pojedynczych fotonów, a jest to zagadnienie dla kwantowej kryptografii zupełnie fundamentalne: gdy wygenerujemy zamiast pojedynczego choćby dwa fotony, przejście jednego z nich (a zatem zmiana jego parametrów) może zostać niezauważona, gdyż tę samą informację niosą obydwaj; drugi jest poprawny.

Stosowane są różne metody zapobiegania wysyłaniu wielokrotnionych fotonów. Jednym ze sposobów jest użycie bardzo słabych impulsów laserowych (w zakresie femtosekund). Jednakże osiągnięcie stabilnej pracy urządzenia na tym poziomie mocy jest trudne. Niektóre z tych impulsów mogą nie zawierać fotonów wcale, podczas gdy inne mogą ich zawierać dwa lub więcej. Ponadto słabe impulsy zanikają na dłuższych łączach, a więc klucze kryptograficzne nie mogą być przesyłane na dłuższych dystansach.

Zagadnienie jest tak ważne, że na całym świecie, również w Polsce, trwają intensywne prace nad dobrymi źródłami pojedynczych fotonów. Źródła fotonów, które wykorzystywały spontaniczną przemianę częstotliwości w kryształach nieliniowych nie były wydajne. Mniej więcej od dekady, fizycy próbowali generować pojedyncze fotony nie tylko w kryształach, ale także w falowodach nieliniowych, z użyciem zjawiska fluorescencji parametrycznej, w której generacja fotonu nie wynika z uprzedniego wzbudzenia atomu, a ze specyficznych, nieliniowych cech potencjału elektrycznego, w którym poruszają się elektrony [4].

Do generacji fotonów przydatnych w informatyce kwantowej dość intensywnie rozwijano w ostatnich latach technologie kropek kwantowych. Kropki kwantowe to struktury półprzewodnikowe o nanometrowej wielkości we wszystkich trzech wymiarach. Uwięzione w nich elektrony i dziury emitują fotony o ściśle określonych energiach, podobnie jak atomy, np. [5]. Niestety, proces ten wymaga niskich temperatur, co przekreśla na razie zastosowania praktyczne.



Rys. 1. Przyrząd Mizuochi (rys. z [6]): a) sieć krystaliczna diamentu z atomem azotu; b) schemat diody emitującej pojedynczy foton. Grubości warstw p, i oraz n wynoszą odpowiednio 0,5 mm, 10 μ m oraz 0,5 μ m. Metodą suchego trawienia warstwy n, grubość warstwy i zmniejszła się o 200...300 nm. Elektrody wykonano z tytanu (30 nm), platyny (100 nm) i złota (200 nm); c), charakterystyka napięciowo-prądowa złącza p-i-n pokazuje idealną charakterystykę diody

Fig. 1. Mizuochi's structure [6]; a) atomic structure of an NV centre consisting of a substitutional nitrogen atom and a nearby vacancy in the diamond lattice. b) schematic diagram of the single-photon-emitting diode. The thicknesses of the p-type, intrinsic and n-type layers of the device are 0.5 mm, 10 μ m and 0.5 μ m, respectively. As a result of dry etching of the n-layer, the thickness of the i-layer was reduced by 200–300 nm. The device was contacted on both interfaces using titanium(30 nm)/platinum(100 nm)/gold(200 nm) electrodes (see Methods). c, I-V properties of the p-i-n junction in a log plot, showing an ideal diode characteristic with a rectification ratio of $\sim 1 \times 10^9$ at ± 30 V. Maximum current densities on the order of 1×10^5 mA cm⁻² were achieved



Nowszym źródłem fotonów, które działa w zwykłej temperaturze jest struktura zbudowana na kryształach diamentu zawierającym defekt zwany wakiem azotu NV (*Nitrogen Vacancy*). Defekt ten występuje wtedy, gdy w sieci krystalicznej atom azotu zastąpi atom węgla. Struktura NV może być źródłem pojedynczych fotonów jeśli zostanie pobudzona laserem o właściwej długości fali (zjawisko fotoluminescencji). Jednak przyrząd o takiej strukturze został również uznany za niepraktyczny ze względu na zastosowanie lasera.

W kwietniu 2012 roku została opublikowana (przesłana do druku 8 sierpnia 2011, zaakceptowana do druku 5 marca 2012) praca Norikazu Mizuochi z japońskiej Agencji Nauki i Technologii i wielu współpracujących naukowców [6], która została uznana powszechnie za przełomowe osiągnięcie w dziedzinie źródeł fotonów. W pracy tej wykazano, że wakiem azotu w kryształach diamentu może emitować pojedyncze fotony przez elektryczne a nie laserowe pompowanie struktury, a więc wykorzystanie zjawiska elektroluminescencji. Ma to zasadnicze znaczenie dla miniaturyzacji, ceny i praktycznej przydatności przyrządu, który składa się z niedomieszkowanej warstwy diamentu o wysokiej czystości zawierającego defekt NV, umieszczonego dwiema domieszkowanymi warstwami *p* i *n* (struktura *p-i-n*).

W pracy [6] wykazano, że efektywne generowanie pojedynczych fotonów metodą elektroluminescencji z pojedynczych defektów w diamentach wymaga syntezy par elektron-dziura w materiałach półprzewodzących typu *n* i *p* oraz ultraczystej wewnętrznej warstwy *i* w strukturze *p-i-n* diody. Wyjaśniono, że gdy elektron i dziura, w wyniku przyłożonego napięcia zostaną

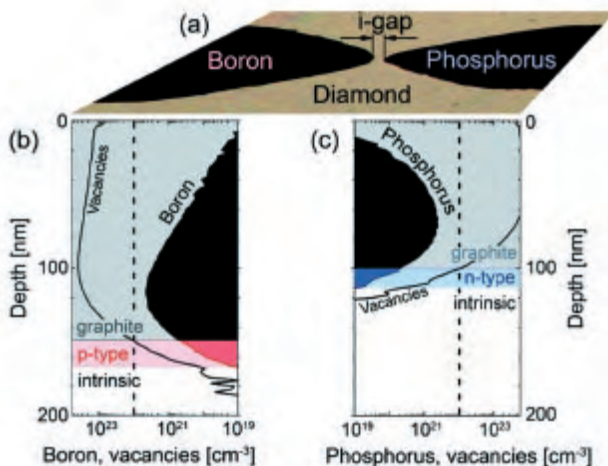
wciągnięte do warstwy wewnętrznej, pobudzają wakiem azotu, powodując elektroluminescencję i emisję pojedynczych fotonów.

Publikacja [6] spotkała się z żywym przyjęciem fizyków pracujących nad problemem efektywnej generacji pojedynczych fotonów. Przykładem jest Jean-Francois Roch z paryskiego Laboratorium Fotoniki Kwantowej i Molekularnej, pracujący nad podobnymi rozwiązaniami, powiedział physicsworld.com, że *najnowsze dzieło jest imponujące. Szczercie mówiąc grupa Mizuochiego wykonała bardziej dokładną analizę niż my*. Z kolei Muhammad Asghar z National Centre for Physics w Islamabadzie napisał: *Simple and beautiful. Clean and clear thing, this diamond based n-i-p LED, operated via an electric voltage at room temperature, where the single photon is produced by the electroluminescence proces through the interaction of the electrons and the holes with the nitrogen vacancy (NV) in the central „i” part of the LED.*

Podobne rozwiązanie prawie jednocześnie opracowano w Europie [7]. Zostało ono przekazane do druku 2.10.2011, a opublikowane 21.12.2011. W pracy [6] podano informację w postaci uwagi: *Note added in proof: During the review process we became aware of independent research about electroluminescence from a single NVO in a light-emitting diode made by ion implantation, which was submitted after our submission and has now been published.*

W pracy [7] podobnie jak w [6], przedstawiono niechłodzony przyrząd półprzewodnikowy typu diody LED o strukturze *p-i-n* emitującej pojedyncze fotony w widzialnym zakresie widma. W odróżnieniu od [6] dioda została wykonana na wysokiej jakości monokryształach diamentu przez implantację jonów boru i fosforu dla uzyskania domieszkowania odpowiednio typu *p* i typu *n*.

Przedstawione prace rokuja opracowanie tanich i niewielkich źródeł pojedynczych fotonów, co może mieć bardzo duże znaczenie dla praktycznych konstrukcji urządzeń kryptografii kwantowej, a także szerzej, informatyki kwantowej. Mimo bowiem istniejących już handlowych implementacji (np. Toshiba), kryptografia kwantowa jest ciągle tematem bardziej teoretycznym niż praktycznym. Jest doskonała, tyle że jej nie ma. Ale intensywne prace trwają.



Rys. 2. Optyczny obraz struktury *p-i-n* (rys. z [7]). Obszary typu *p* zostały wykonane przez implantację jonów boru o energii 70 keV zaś typu *n* – jonów fosforu o energii 95 keV. Elektryczna aktywacja wszczepionego boru i fosforu została osiągnięta przez wygrzewanie w próżni w temperaturze 1600°C przez 10 godzin. Przerwa między obszarami domieszkowanymi to obszar *i*, a jego szerokość wynosi 1...50 μm dla różnych struktur

Fig. 2. The optical image of one of the fabricated structures *p-i-n* [7]. The *p*-type area of the diodes were made by implantation of boron ions with an energy of 70 keV. The *n*-type area of the diodes were made by implantation of phosphorus ions with an energy of 95 ke. The electrical activation of the implanted boron and phosphorus was achieved by postimplantation annealing in vacuum at a temperature of 1600°C for 10 h. The gap formed between of the boron- and phosphorus-implanted domains defined the *i*-area of the diode. The length of the *i*-area varied from 1 μm to 50 μm for different structures

Literatura

- [1] Nowakowski W.: O kryptografii kwantowej. Elektronika, nr 2/2010, Warszawa.
- [2] Czajkowski R., Nowakowski W.: O protokole Ekerta w kryptografii kwantowej. Elektronika, nr 3/2010, Warszawa.
- [3] Nowakowski W.: Kwantowa dystrybucja klucza. Postępy i problemy. Elektronika, nr 3/2012, Warszawa.
- [4] Karpiński M., Radzewicz Cz., Banaszek K.: Dispersion-based control of modal characteristics for parametric down-conversion in a multimode waveguide. Optics Letters t. 37/2012.
- [5] Santori C., Fattal D., Vuckovic J., Solomon G.S., Yamamoto Y.: Generation of single photons and correlated photon pairs using InAs quantum dots. Fortschr. Phys. 52, No. 11–12, Fortschr. Phys. 52, No. 11–12, 2004/www.fp-journal.org
- [6] Mizuochi N., Makino T., Kato H., Takeuchi D., Ogura M., Okushi H., Nothhaft M., Neumann P., Gali A., Jelezko F., Wrachtrup J., Yamasaki S.: Electrically driven single-photon source at room temperature in diamond. Nature Photonics 6, 2012./<http://www.nature.com/nphoton/journal/v6/n5/full/nphoton.2012.75.html>
- [7] Lohmann A., S. Pezzagna S., Dobrinets I., Spinicelli P., Jacques V., Roch J.F., Meijer J., Zaitsev A.M.: Diamond based light-emitting diode for visible single-photon emission at room temperature. Appl. Phys. Lett. 99, 251106, 2011/ http://apl.aip.org/resource/1/applab/v99/i25/p251106_s1?isAuthorized=no#artObjFig