

Półprzewodnikowe kropki kwantowe

Jan GAJ, Warszawa

• Po co zajmować się kropkami?

Lasery półprzewodnikowe

W każdym czytniku płyt kompaktowych znajduje się laser półprzewodnikowy. Lasery półprzewodnikowe robiono początkowo z półprzewodnika litego o makroskopowych rozmiarach (rzędu milimetra), później przekonano się, że ograniczając swobodę ruchu elektronów choć w jednym kierunku (studnia kwantowa) ułatwiamy emisję światła czyniąc laser wydajniejszym. W kropkach kwantowych ten efekt powinien być jeszcze silniejszy, ponieważ ruch elektronów w kropce jest ograniczony we wszystkich trzech wymiarach.

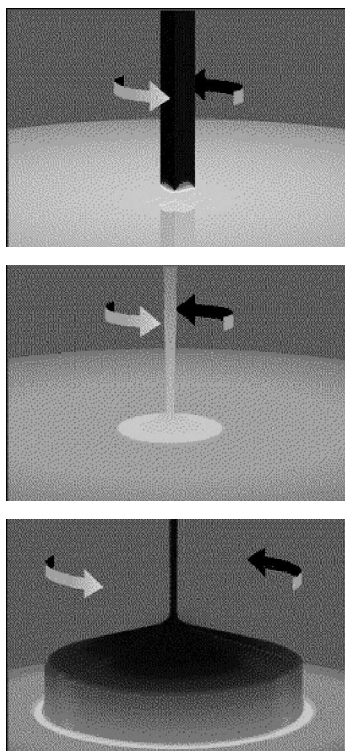
Pojedyncze fotony i pary fotonów

Fizycy marzą o zbudowaniu komputera kwantowego, który zdeklasowałby dziś działające komputery. W takim komputerze miejsce bitów (element informacji przyjmujący wartość 0 lub 1) zajęłyby bity kwantowe (qbity), które reprezentują obie wartości z określonymi prawdopodobieństwami. Fizyczną realizacją qbitu może być foton (kwant światła) o dwóch możliwych polaryzacjach kołowych. Kropka kwantowa może stanowić źródło fotonów wysyłanych „na komendę”, które mogłyby znaleźć zastosowanie w przyszłym komputerze kwantowym, a już dziś są wykorzystywane w kryptografii kwantowej, znacznie skuteczniejszej od klasycznej.

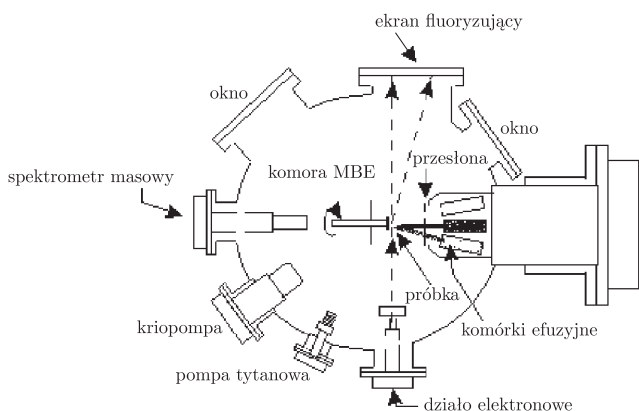
• Jak się robi krysztal?

Klasyka: metoda Czochralskiego

Wytwarzanie kropek kwantowych rozpowszechniło się dzięki rozwojowi technologii półprzewodnikowej, czyli metod wytwarzania krysztalów i struktur półprzewodnikowych. Do klasyków w tej dziedzinie należy Jan Czochralski, urodzony w 1885 roku w wielkopolskim miasteczku Kcynia, należącem wówczas do Prus. Pod względem obecności w światowej literaturze naukowej Jan Czochralski może współzawodniczyć z Marią Curie-Skłodowską. Fakt, że jego nazwisko jest właściwie szerokiej publiczności w Polsce nieznanie, można przynajmniej po części tłumaczyć niezdecydowaną postawą środowiska naukowego Politechniki Warszawskiej, której był profesorem. Po drugiej wojnie światowej wysuwano przeciw niemu zarzuty kolaboracji z władzami okupacyjnymi. Choć sąd go od tych zarzutów oczyścił, został usunięty z Politechniki i dokończył życia w zapomnieniu w rodzinnej Kcyni. Metoda Czochralskiego, używana dziś powszechnie na świecie do wytwarzania krysztalów półprzewodnikowych, polega na powolnym wyciąganiu ze stopionej masy półprzewodnika zarodka – małego krysztalka, na którym rośnie wytwarzany krysztal w kształcie walca o średnicy nawet kilkudziesięciu centymetrów. Zarodek jest w czasie wzrostu powoli obracany (rys. 1).



Rys. 1. Kolejne fazy wzrostu krysztalu metodą Czochralskiego

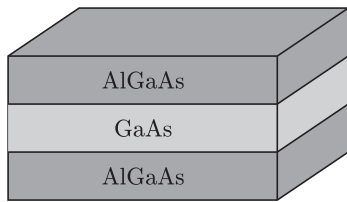


Rys. 2. Schemat układu do epitaksji z wiązki molekularnej

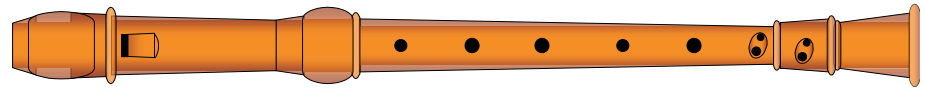
Współczesność: epitaksja

Pod koniec lat siedemdziesiątych zaczęła się rozpowszechniać metoda **epitaksji z wiązki molekularnej** (MBE – Molecular Beam Epitaxy), w której krysztal wytwarzany jest przez nanoszenie kolejnych warstw atomowych na podłoże umieszczone w komorze, w której wytworzono wysoką próżnię. Na powierzchnię podłoża kierowane są wiązki atomów lub cząsteczek (rys. 2).

Ta metoda jest stosowana przede wszystkim do wytwarzania struktur półprzewodnikowych, jak na przykład wspomnianych już studni kwantowych, w których swoboda ruchu elektronu ograniczona jest do



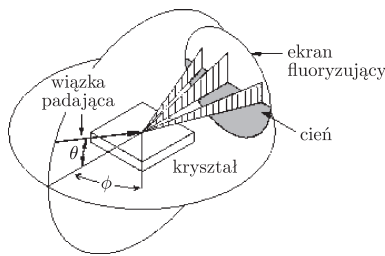
Rys. 3. Studnia kwantowa z arsenku galu między barierami z AlGaAs



Rys. 4. Flet prosty – jednowymiarowy rezonator akustyczny

Obserwacja powierzchni kryształu w czasie wzrostu

W epitaksji z wiązki molekularnej bardzo ważna jest kontrola jakości powierzchni kryształu w czasie wzrostu. Wykorzystuje się do tego dyfrakcję elektronów (RHEED – Reflection High Energy Electron Diffraction). Na ekranie fluoryzującym ogląda się obraz dyfrakcyjny wytworzony przez wiązkę elektronów skierowaną pod niewielkim kątem na powierzchnię kryształu w czasie wzrostu (rys. 5).



Rys. 5. Schemat powstawania obrazu dyfrakcyjnego RHEED

Obraz w formie prążków świadczy o dyfrakcji na obiekcie dwuwymiarowym – atomowo gładkiej powierzchni. Jeżeli powierzchnia staje się nierówna, otrzymujemy obraz w formie plamek świadczący o trójwymiarowym charakterze dyfrakcji.

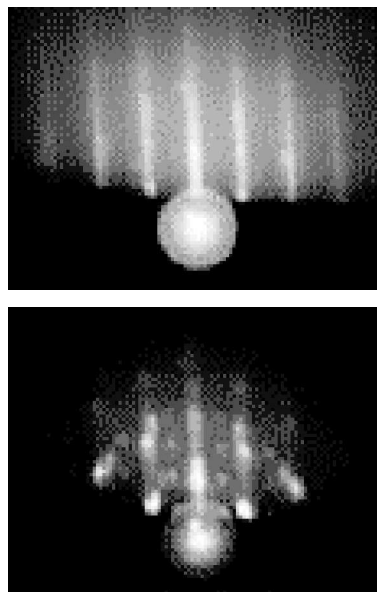
Szczęśliwe niepowodzenie: wzrost kropek kwantowych

Zazwyczaj prowadząc wzrost epitaksjalny staramy się tak dobrać parametry (temperatura podłoża, szybkość wzrostu), żeby utrzymać atomową gładkość powierzchni kryształu. Może to być szczególnie trudne w przypadku niedopasowania hodowanej warstwy do podłoża pod względem odległości między sąsiednimi atomami w kryształach. Tworzy się wtedy warstwa naprężona, która wcześniej czy później znajduje sobie sposób na uwolnienie się od naprężenia. Jednym z takich sposobów jest samorzutne tworzenie się kropek kwantowych – tworów ograniczonych we wszystkich trzech wymiarach (rys. 7).

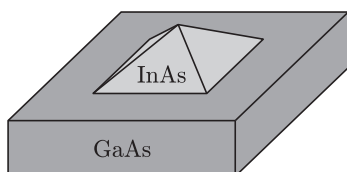
Kropka kwantowa stanowi dla fali elektronowej rezonator trójwymiarowy, jak na przykład okaryna dla fali dźwiękowej. Warto docenić eksperymentatorów, którzy potrafili w ostatniej dekadzie XX wieku przekuć niepowodzenie („nieudany” wzrost kryształu) w sukces (wyhodowanie układu kropek kwantowych). Otrzymuje się w ten sposób zazwyczaj dość gęste układy (rzędu 10^{10} kropek na cm^2 i więcej). Typowe rozmiary kropek kwantowych to pojedyncze nanometry (wysokość) i dziesiątki nanometrów (szerokość).

• Oglądanie małego

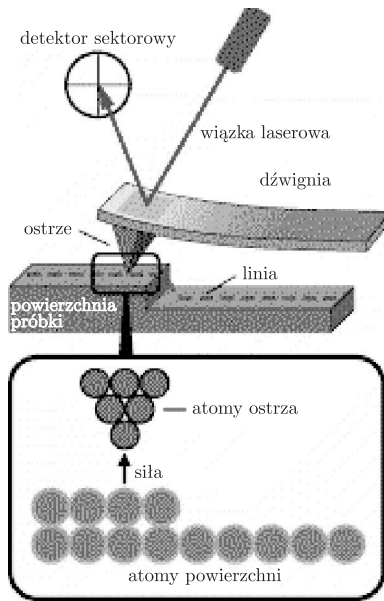
Niewielkie rozmiary kropek kwantowych czynią ich obserwację niełatwym zadaniem. Klasyczne narzędzie do oglądania małych przedmiotów – mikroskop optyczny – jest do tego celu bezużyteczny ponieważ kropki kwantowe są znacznie mniejsze od długości fali świetlnej (setki nanometrów). Z pomocą przychodzi nam wynaleziony w latach osiemdziesiątych mikroskop skaningowy (od ang. scan – przeglądać). Jego działanie można porównać do gramofonu, w którym igła wodzi po powierzchni płyty i zamienia nierówności jej powierzchni na sygnał elektryczny. To samo dzieje się w mikroskopie skaningowym, a sygnał elektryczny zamiast jak w gramofonie uruchamiać głośnik, doprowadzany jest do komputera, który odtwarza kształt tak „ogładanej” powierzchni. Najważniejsza jednak różnica między gramofonem a mikroskopem skaningowym leży w ostrości igły, której koniec stanowi pojedynczy atom, oraz odpowiedniej precyzji przesuwu ostrza względem badanej powierzchni. Ta precyzja sprawia, że mikroskop skaningowy może rejestrować nierówności milion razy mniejsze niż igła gramofonu. Za wynalezienie mikroskopu skaningowego Gerd Binnig i Heinrich Rohrer otrzymali w 1986 roku nagrodę Nobla. Do oglądania kropek kwantowych używa się najczęściej odmiany mikroskopu skaningowego zwanej mikroskopem sił atomowych (AFM – atomic force microscope), w którym



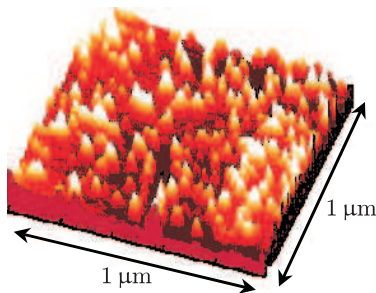
Rys. 6. „Dobry” (u góry) i „zły” (u dołu) obraz dyfrakcyjny RHEED



Rys. 7. Schematyczny rysunek kropki kwantowej z arsenku indy wyhodowanej na podłożu z arsenku galu



Rys. 8. Iгла w rowku płyty gramofonowej i zasada działania najnowszej wersji takiego układu – mikroskopu AFM.



Rys. 9. Kropki kwantowe wytworzone w laboratorium CEA w Grenoble [1]

ruch ostrza przetwarzany jest na sygnał elektryczny za pośrednictwem wiązki laserowej padającej na detektor sektorowy (rys. 8).

Otrzymany przy użyciu mikroskopu AFM obraz układu kropek kwantowych wytworzonego metodą epitaksji z wiązki molekularnej przedstawia rysunek 9.

• Światło

klasycznie: fala elektromagnetyczna

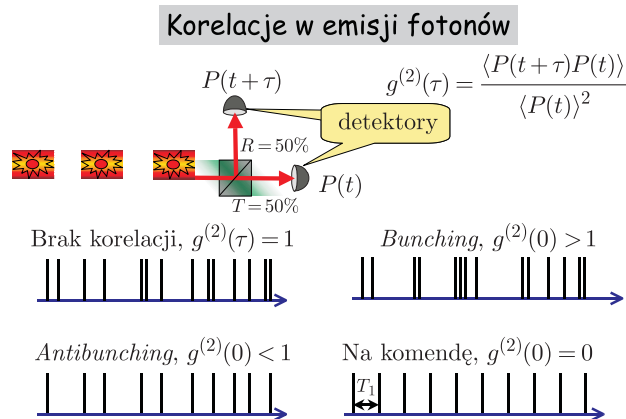
Jeżeli interesujemy się kropką kwantową jako źródłem światła warto zatrzymać się nad właściwościami tego ostatniego. Klasyczny obraz światła jako fali elektromagnetycznej znany od około półtora wieku. Zawdzięczamy go Jamesowi Clerkowi Maxwellowi, który ujął zjawiska elektromagnetyzmu w swoje słynne równania. Jednak obraz światła jako rozchodzącej się w sposób ciągły fali nie utrzymał się długo w konfrontacji z doświadczeniami, a szczególnie z wynikami badań efektu fotoelektrycznego.

współcześnie: fotony

Dzisiaj (a współczesność ta datuje się od prawie stu lat) uważamy światło raczej za strumień fotonów – „paczek” fali elektromagnetycznej o określonej energii, proporcjonalnej do częstości drgań tej fali. Głównym autorem tego obrazu jest Max Planck, uhonorowany nagrodą Nobla w 1918 roku. Ten ziarnisty charakter światła pozwala mówić o jego statystycznych właściwościach. Rejestrując indywidualne fotony padające na odpowiedni detektor możemy ustalić, czy przybywają one w sposób przypadkowy, czy też mają tendencję do grupowania się lub przeciwnie do unikania bliskości. Rachunkowo takie właściwości opisuje na przykład funkcja autokorelacji

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle P(t+\tau)P(t) \rangle}{\langle P(t) \rangle^2}$$

wyrażającą się przez gęstość prawdopodobieństwa P zależną od czasu t . Funkcja autokorelacji jest prawdopodobieństwem warunkowym zarejestrowania fotonu w czasie $t + \tau$ wiedząc, że w czasie t został zarejestrowany foton. Dla strumienia nieskorelowanych fotonów funkcja autokorelacji jest równa jedności. Wartość większa od jedności opisuje skłonność fotonów do grupowania się, mniejsza – do unikania się wzajemnie. Te dwie sytuacje są odpowiednio określane angielskimi terminami bunching i antibunching (rys. 10).



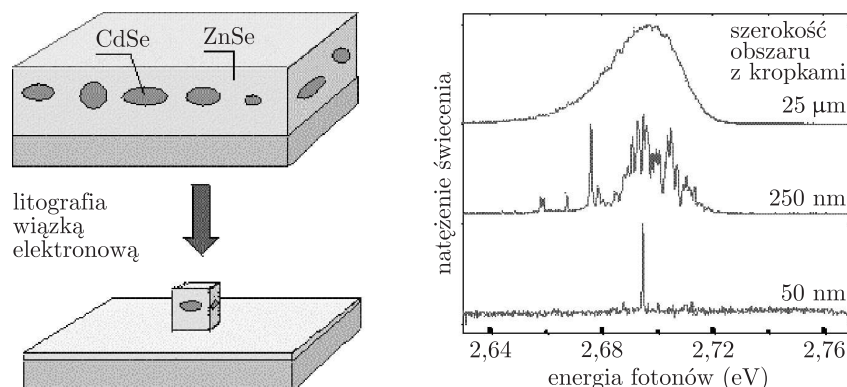
Rys. 10. Schemat pomiaru autokorelacji w strumieniu fotonów i typy rozkładu fotonów w czasie

• Kropka kwantowa jako źródło światła

Widma świecenia kropek kwantowych

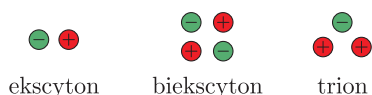
Stany elektronów w kropce kwantowej, podobnie jak stany atomowe, są ograniczone we wszystkich trzech wymiarach. Objawia się to w widmie świecenia kropki składającym się, podobnie jak w atomie, z dyskretnych linii widmowych. Jednak poszczególne kropki powstające w procesie wzrostu epitaksjalnego nieco się różnią rozmiarami i kształtem, dlatego widmo świecenia próbki zawierającej kropki ma postać szerokiego maksimum powstałego ze zlania się wielu linii. Można sobie z tym poradzić przez selekcję przestrzenną dokonaną na przykład metodą litograficzną ograniczając obszar obserwacji, a więc i liczbę jednocześnie

obserwowanych kropek. Im mniejszy obszar, tym mniej linii widmowych obserwujemy (rys. 11).

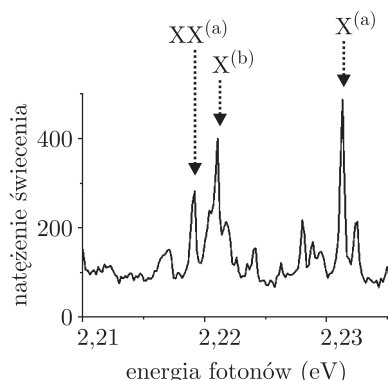


Rys. 11. Widmo świecenia kropek kwantowych w zależności od wielkości obszaru obserwacji

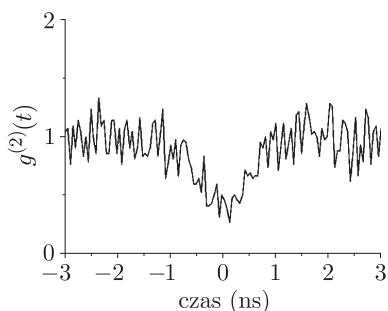
W doświadczeniach przeprowadzonych na Uniwersytecie J. Fouriera w Grenoble [2] wykorzystywaliśmy do ograniczenia obszaru obserwacji maskę aluminiową z otworem o szerokości 200 nm. W tym obszarze znajdowało się wiele kropek, konieczna więc była dodatkowa selekcja spektralna polegająca na wydzieleniu wąskiego obszaru widmowego, w którym obserwowaliśmy świecenie tylko jednej kropki kwantowej.



Rys. 12. Kwazicząstki w półprzewodniku, które mogą być źródłem fotonów



Rys. 13. Widmo świecenia próbek z kropkami kwantowymi [2]. Linie oznaczone symbolem X pochodzą z rekombinacji ekscytonów, XX – biexcytonów. Litera a i b oznaczają dwie różne kropki kwantowe.



Rys. 14. Współczynnik autokorelacji zmierzony [2] w funkcji odległości czasowej między dwoma fotonami wyemitowanymi przez rekombinujące ekscytony

Co świeci w kropce?

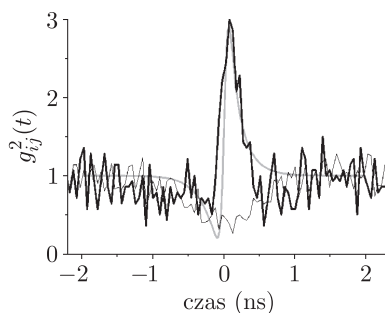
Pobudzenie półprzewodnika polega najczęściej na uwalnianiu elektronów tworzących wiązania międzyatomowe, co opisujemy jako przenoszenie ich do pasma przewodnictwa, czyli obszaru energii elektronów mogących swobodnie poruszać się po kryształ. W wiązaniach (odpowiadający im obszar energii nazywamy pasmem walencyjnym) pozostają po tych elektronach wolne miejsca zwane dziurami. Dziurze w paśmie walencyjnym przypisujemy jednostkowy ładunek dodatni. Dziura i ujemny elektron przyciągają się tworząc podobny do atomu wodoru stan związany zwany ekscytonem. Ostatecznie elektron zazwyczaj powraca do pasma walencyjnego rekombinując, jak mówimy, z dziurą i wysyłając nadwyżkę energii w postaci fotonu. Oprócz ekscytonów w półprzewodniku mogą się też tworzyć biexcytony (zawierające po dwa elektrony i dwie dziury) i ekscytony naładowane (na przykład dwa elektrony i jedna dziura), zwane też trionami. Wszystkie te twory – kwazicząstki (rys. 12) mogą wysłać fotony w procesach rekombinacji, w szczególności znajdując się w kropkach kwantowych.

Linie widmowe z rysunku 11 pochodzą właśnie z rekombinacji takich kwazicząstek. Kto chce się dowiedzieć, jak się ustala, od jakiej kwazicząstki pochodzi konkretna linia widmowa, może zajrzeć do oryginalnych publikacji [3]. W dalszych rozważaniach tu eksperymentach skupiliśmy się na dwóch spośród linii widocznych na rys. 13, pochodzących z rekombinacji ekscytonu i biexcytonu w tej samej kropce kwantowej.

Pomiary korelacji

Jeżeli wybierzemy energię fotonów odpowiadającą jednej linii widmowej, możemy badać statystykę fotonów pochodzących z rekombinacji na przykład ekscytonów w tylko jednej kropce kwantowej. W praktyce osiąga się to przez umieszczenie przed detektorami z rysunku 10 monochromatorów, które z całego widma wybierają wąski zakres energii fotonów odpowiadających jednej linii. Reszta jest sprawą techniki elektronicznej, która pozwala otrzymać histogram liczby fotonów zarejestrowanych przez jeden z detektorów w zależności od odległości czasowej od wybranego aktu rejestracji fotonu w drugim detektorze. Stąd prosta droga do obliczenia współczynnika autokorelacji przedstawionego na rys. 14.

Jak widać, współczynnik ten ma wyraźne minimum przy zerowej odległości czasowej (na krzywej widoczny jest także szum zakłócający pomiar), co tłumaczymy koniecznością ponownego wytworzenia ekscytonu w kropce



Rys. 15. Współczynnik korelacji między emisją fotonu bieksytonowego a ekscytonowego (linia gruba czarna) porównany ze współczynnikiem autokorelacji z rys. 14 (linia cienka czarna) i wynikiem rachunku teoretycznego (linia szara). Według pracy [2].

kwantowej po jego rekombinacji. Z rysunku 14 możemy odczytać, że czas na to potrzebny jest mniejszy od jednej nanosekundy. Istnienie minimum w zmierzonej funkcji autokorelacji potwierdza, że nie obserwujemy fotonów z dużego zbioru kropek kwantowych, bowiem wtedy spodziewalibyśmy się rozkładu przypadkowego ze współczynnikiem autokorelacji równym jedności.

Możemy iść dalej w badaniu korelacji ustawiając jeden z monochromatorów na linię bieksytonu, pozostawiając drugi dostrojony do linii ekscytonu. Mierzmy wtedy korelację między fotonem bieksytonowym a ekscytonowym. Wynik takiego pomiaru przedstawiono na rys. 15.

Zero skali czasowej na tym rysunku odpowiada emisji bieksytonu. Widać, że w pewnym krótkim czasie po emisji fotonu bieksytonowego współczynnik korelacji jest znacznie większy od jedności. Tłumaczymy to faktem, że tuż po rekombinacji bieksytonu w kropce znajduje się ekscyton, co czyni prawdopodobieństwo emisji fotonu ekscytonowego maksymalnym. Rachunek modelowy przewiduje też obniżenie współczynnika korelacji dla czasów ujemnych (foton ekscytonowy przed bieksytonowym) wynikające stąd, że kropka zawierająca ekscyton nie wyemituje fotonu bieksytonowego. Ten wynik rachunku modelowego nie został w sposób zdecydowany potwierdzony w doświadczeniu.

Dla ambitnych: splątanie

Marzeniem fizyków zaangażowanych w tego rodzaju eksperymenty jest uzyskanie splątanej pary fotonów. Stan splątania, potencjalnie niesłychanie użyteczny zarówno w kryptografii jak i w przyszłych komputerach kwantowych, nie da się opisać w kategoriach fizyki klasycznej. Przykładem może tu być stan dwóch fotonów o przeciwnych polaryzacjach kołowych. Wiemy o nim tylko tyle, że w dwóch fotonach pole elektryczne fali świetlnej kręci się w przeciwną stronę: w jednym w lewo, a drugim w prawo. Możemy takie dwa fotony wysłać jeden do Nowego Jorku a drugi do Władywostoku nie zmieniając tej właściwości. Nie wiemy jednak, w którym pole to kręci się w prawo, a w którym w lewo, i nie możemy się tego dowiedzieć z przyczyn fundamentalnych – to jest tajemnica fizyki kwantowej. Gdybyśmy jednak dokonali pomiaru polaryzacji kołowej (czyli tego kierunku obrotu) na fotonie z Nowego Jorku, to otrzymalibyśmy jeden z dwóch jednakowo prawdopodobnych wyników: w prawo lub w lewo. Wtedy natychmiast wiedzielibyśmy, że foton we Władywostoku ma polaryzację przeciwną – lewoskrętną. Nic dziwnego, że fizycy kochają stany splątane. Zostały one wytworzone doświadczalnie w różnych sytuacjach, ale nigdy na parze fotonów bieksytonowy-ekscytonowy z kropki kwantowej. W wyścigu do tego celu uczestniczy kilka laboratoriów ze światowej czołówki – ciekawe, kto będzie pierwszy.

• Podsumowanie

- Do wytworzenia kropek kwantowych nie wystarcza klasyczna metoda Czochralskiego. Stosuje się w tym celu współczesną metodę epitaksjalnego wzrostu kryształu z wiązki molekularnej (MBE).
- Oglądanie kropek wymaga czegoś więcej niż klasyczny mikroskop optyczny. Świetnym narzędziem jest mikroskop sił atomowych (AFM), w którym obraz powierzchni otrzymuje się wodząc po niej niezwykle precyzyjnym ostrzem.
- Światło, które klasycznie uważano za ciągłą falę elektromagnetyczną jest dziś opisywane jako strumień fotonów. Ze źródeł makroskopowych fotony wysyłane są przypadkowo, natomiast w strumieniu fotonów z jednej kropki kwantowej możemy wykryć grupowanie się (bunching) lub unikanie się (antibunching) poszczególnych fotonów.
- Kropka kwantowa wysyła fotony przez rekombinację elektronu z dziurą w ekscytonie (któremu zdarza się być naładowanym) lub w bieksytonie.
- Para fotonów może być splątana z wielkim pożytkiem dla zastosowań w informatyce kwantowej.
- Dotychczas nie zaobserwowano splątanych par fotonów ekscytonowo-bieksytonowych z kropek kwantowych.

Literatura

- [1] F. Tinjod, B. Gilles, S. Moehl, K. Kheng, and H. Mariette, *Appl. Phys. Lett.* 82, 4340 (2003).
- [2] C. Couteau, S. Moehl, F. Tinjod, J.M. Gérard, K. Kheng, H. Mariette, J. A. Gaj, R. Romestain, and J.P. Poizat, *Appl. Phys. Lett.*, w druku.
- [3] na przykład A. Kudelski, K. Kowalik, A. Golnik, G. Karczewski, J. Kossut, and J. A. Gaj, *J. Lumin.*, w druku.