

Koncert kwantowy

Muzyk swój kunszt może wykazać dopiero, gdy ma do dyspozycji odpowiedni instrument. Marzeniem każdego skrzypka są legendarne stradivariusy (przynajmniej przekonani są o tym ci, którzy na skrzypcach nie grają). Wykonanie instrumentu o wyjątkowym brzmieniu wymaga nieprzeciętnych umiejętności, graniczących z magią. Zdobywane przez długie lata doświadczenie często pozostaje tajemnicą firmy. Jest przekazywane „z ojca na syna”. Prawie dla każdego rodzaju instrumentu można podać tę „najlepszą” firmę, często sygnowaną nazwiskiem jej założyciela. Czy słyszeliście jednak o firmie *Mohanty*? Pewnie nie słyszeliście, a szkoda. Skonstruowano w niej jedyny w swoim rodzaju instrument. Nigdy nic, co „ręką ludzką uczynione”, nie grało w taki sposób.

Zadziwiającym instrumentem [1], któremu poświęcone są bieżące aktualności, jest pokazany na zdjęciu... grzebień. Może powiecie, że nie słyszeliście jeszcze o wirtuozach grzebienia? Przyznam się, że do niedawna ja również nie słyszałem. Sprawa trochę się wyjaśni, gdy dokładniej opiszemy to coś, co pokazane jest na zdjęciu. Konstruktorzy nazywają swój instrument anteną, a nie grzebieniem. Ale czy ktoś kiedyś słyszał, żeby grać na antenie?

Widoczne na zdjęciu (mikrografii zrobionej za pomocą mikroskopu elektronowego) coś może budzić więcej skojarzeń. Najczęściej wydaje się przypominać szkielet „lub coś w tym rodzaju” jakiegoś żywego organizmu [2]. Gdyby to jednak miał być kręgowiec, to musiałby być wyjątkowo mały. Pokazany szkielet ma długość około $10\ \mu\text{m}$, szerokość $400\ \text{nm}$, nie licząc żeber, które mają długość $500\ \text{nm}$. Porównywalnej wielkości są roztocza.

Grzebień jest wykonany z monokryształu krzemu za pomocą litografii elektronowej i „nanomachinacji” (angielski termin *nanomachining* został użyty przez autorów pracy [1], ale bez żadnego wyjaśnienia, na czym innym niż litografia ta machinacja polegała). Z jednej strony został przygotowany kontakt elektryczny ze złotą (słabo widoczna jaśniejsza warstwa na bliższej płytce kończącej grzebień).

Skoro instrument mamy już przygotowany (opisany), to należałoby na nim zagrać. Autorzy zaangażowali w tym celu znanego wirtuoza – Lorentza. Wystarczyła im jego siła, osoba nie była potrzebna. Instrument umieścili w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji $16\ \text{T}$ skierowanej prostopadle do osi grzebienia. Jako smyczka użyto prądu o określonej częstotliwości podawanego poprzez złotą elektrodę. Siła Lorentza wymusza w takim przypadku drgania instrumentu.

Jak silny może być tak wzbudzany dźwięk? Wcześniej w podobnych urządzeniach udawało się uzyskać amplitudy rzędu femtometrów. To nie pomyłka. Chodzi o amplitudy rzędu rozmiarów jąder atomowych! Czyli tysiące razy mniejsze od rozmiarów atomu. Skoro te ruchy są tak nieznaczne (słowo „mikroskopijne” czy nawet „nanoskopijne” jest zupełnie nieadekwatne), to możemy powoli przestać się dziwić słowu „kwantowy” w tytule. Rzeczywiście, autorzy biorą udział w konkursie na pierwszy kwantowy koncert wykonany makroskopowym instrumentem. W dodatku twierdzą, że go wygrali.

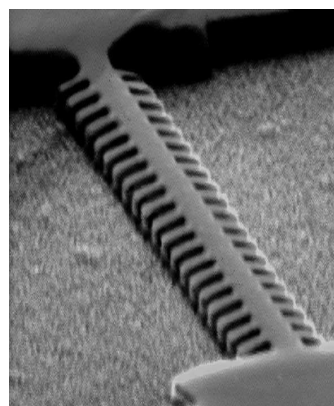
Jeżeli im się udało (krygują się, że nie są jeszcze w stanie tego bezapelacyjnie udowodnić), to zawdzięczają to nowemu

podejściu. Dotąd wysiłki nanomuzyków koncentrowały się na detekcji tak małych amplitud. Zwycięzcy natomiast postanowili tego typu drgania wzmocnić. I do tego właśnie potrzebowali tej grzebieniopodobnej struktury. Nawet jeżeli amplituda drgań pojedynczych zębów jest rzędu femtometrów, to potrafią one rozbujać cały grzebień do amplitudy kilkudziesięciu pikometrów (czyli rzędu rozmiarów atomu: $100\ \text{pm} = 1\ \text{Å}$).

Kiedy jednak efekty kwantowe mogą pojawić się w ruchu obiektu makroskopowego i jak mogą się one przejawiać? Charakterystyczną wielkością jest termiczna liczba obsadzeń $N_{th} = k_B T / h f$. Specjaliści spodziewali się, że jeżeli uda się skonstruować obiekt, który można doprowadzić do warunków, w których $N_{th} \rightarrow 1$, to taki obiekt powinien zacząć wykazywać np. skwantowane poziomy energetyczne. Z powyższego wzoru wynika, że aby liczbę obsadzeń zmniejszyć, należy obniżyć temperaturę T i zwiększać częstość drgań f . Zwiększanie częstości drgań rezonansowych wiąże się jednak ze zmniejszaniem rozmiarów, a z tym z kolei wiąże się zwiększanie odpowiednika stałej sprężyny, a w konsekwencji dalsze zmniejszanie amplitudy. Specjalny kształt grzebienia miał temu niepożądanemu zjawisku przeciwdziałać. Udało się uzyskać drgania o częstotliwości rezonansowej $1,49\ \text{GHz}$ i wystarczająco dużej amplitudzie. Amplituda ta była mierzona poprzez pomiar napięcia prądu indukowanego w grzebieniu.

Można sprawdzić, że w opisanej sytuacji temperaturze $T = 110\ \text{mK}$ odpowiada liczba $N_{th} \sim 1$. Najpierw przeprowadzono jednak pomiary dla temperatury wyższej o rząd wielkości. Sprawdzono, że zgodnie z przewidywaniami amplituda drgań jest proporcjonalna do kwadratu indukcji magnetycznej, czyli stwierdzono klasyczne zachowanie grzebienia. Następnie zbadano układ oziębiony do temperatury $T = 110\ \text{mK}$ i wykryto skokową zależność amplitudy od indukcji pola. Prawie na pewno świadczy to o przechodzeniu ze stanu o najniższej energii do pierwszego stanu wzbudzonego, czyli o oczekiwanym zachowaniu kwantowym.

Myślę, że w najbliższym czasie możemy spodziewać się wielu podobnych koncertów kwantowych.



Piotr ZALEWSKI

[1] A. Gaidarhy i inni, *Evidence for Quantized Displacement in Macroscopic Nanomechanical Oscillators*, Phys. Rev. Lett. **94**,030402(2005)

[2] sondaż przeprowadzony przez autora na niezbyt licznej próbie fizyków