

W ostatnich kilkadziesiąt lat elektronika znacząco się rozwinęła. Dynamiczny postęp technologiczny w dziedzinie przyrządów półprzewodnikowych umożliwił miniaturyzację podstawowych elementów elektronicznych, a w rezultacie: całych urządzeń. Dalsza miniaturyzacja napotyka jednak na wyraźne ograniczenia - nie tylko technologiczne, ale przede wszystkim związane z faktem, iż fizyka klasyczna przestaje być wystarczająca do opisu zjawisk zachodzących na poziomie nanometrowych wielkości. Teoria, która pozwala na ich opis i przewidywanie, jest mechaniką kwantową. Dlatego też współczesna elektronika konieczności potrzebuje wsparcia ze strony teorii kwantowej.

Dalszy postęp technologii i minimalizacji układów elektronicznych wymaga więc całkowitego przeorganizowania dotychczasowego podejścia. Jednym z pomysłów rozwiązania tego problemu jest hipotetyczny komputer kwantowy. Idea komputera kwantowego, zainicjowana przez genialnego fizyka - Richarda Feynmana - już w 1986 roku, polega na wykorzystaniu teorii kwantowej w procesie przechowywania i przetwarzania informacji. Pojedyncza jednostka informacji, tj. bit ("0" lub "1" w klasycznym tranzystorze) została zastąpiona przez bit kwantowy, tzw. kubit, pozwalający na przedstawienie informacji w formie superpozycji dwóch stanów. Badania dotyczące fizycznej realizacji kubitów są od lat przeprowadzane i do wiadomości, i teoretycznie. Wśród propozycji realizacji nanourządzeń przechowujących kwantowe informacje są nanostruktury półprzewodnikowe, m.in. kropki kwantowe. Kropka kwantowa to struktura o rozmiarach rzędu nanometrów, która dzięki odpowiednio przyłożonym potencjałom wie w sobie pewną określoną liczbę elektronów. Można ją sobie wyobrazić jako minimalnych rozmiarów pudełko z elektronami w środku. Dzięki odpowiednim warunkom - wprowadzonym np. przy pomocy zmiany potencjałów - przez kropkę kwantową może przepływać pojedynczy elektron. Oznacza to, że elektrony w naszym "pudełku" mają wystarczającą energię, by jeden z nich uciekł z "pudełka" (do elektrody - tzw. drenu). Gdy tak się stanie, liczba elektronów w "pudełku" zmniejszy się o jeden. Wtedy jednak wewnątrz kropki kwantowej pozostanie puste miejsce po elektronie - wówczas z drugiej strony (innej elektrody, zwanej źródłem) wpadnie nowy elektron i wrócimy do punktu wyjścia: w "pudełku" będzie dokładnie tyle elektronów, ile było na początku. Ten dodatkowy elektron przemieści się do drenu, ze źródła do kropki wpadnie kolejny, itd. Z definicji prądem nazywa się ruch swobodnych ładunków - tutaj: elektronów - w związku z czym opisaliśmy właśnie sytuację przepływu prądu przez kropkę kwantową. Można go eksperymentalnie zablokować, zmieniając wartości poszczególnych potencjałów (tak, aby dojść do warunków tzw. blokady kulombowskiej - prąd nie będzie płynął, a w naszym "pudełku" będzie znajdowała się konkretna, stała liczba elektronów).

Podobne rozwiązanie można przeprowadzić dla większej liczby ułożonych obok siebie "pudełek" - opisałibyśmy w ten sposób tzw. sprężone tunelowo, wielokrotne kropki kwantowe. W takim przypadku również w odpowiednich warunkach prąd może przepływać lub zostać zablokowany. Podwójny układ kropek kwantowych jest jednym z przykładów hipotetycznej realizacji kubitów.

Od klasycznych tranzystorów przeszliśmy do idei przekazywania informacji na pojedynczych cząstkach: elektronach. Zjawiska zachodzące na takim poziomie są do tego stopnia złożone, że zapewne jeszcze długo komputer kwantowy nie znajdzie rzeczywistej, praktycznej realizacji. Póki co konieczne są podstawowe badania własności nanostruktur - zarówno do wiadomości, jak i teoretyczne. Temu właśnie ma służyć proponowany projekt: zbadamy w nim własności i warunki przepływu prądu elektronowego w pojedynczych i podwójnych kropkach kwantowych, odtwarzając teoretycznie do wiadomości związane ze skanowaniem tych nanostruktur ostrzem specjalnego mikroskopu, który jest w stanie zebrać dane dotyczące tak niewielkich struktur (jest to technika mikroskopii bramki skanującej: SGM). Ostrze mikroskopu potrafi manipulować warunkami, w jakich znajduje się układ, dzięki czemu technika SGM może być stosowana do eksperymentów związanych ze znoszeniem blokady kulombowskiej (tzw. mikroskopia blokady kulombowskiej). Takie do wiadomości konieczne potrzebują wyjaśnienia teoretycznego. Z drugiej zaś strony: teoretyczne rozwiązania mogą doprowadzić do na tyle ciekawych wyników, że opłacalnym będzie wykonanie zaproponowanego przez teoretyków eksperymentu.

Zjawiska zachodzące w nanostrukturach są opisywane bardzo skomplikowanymi równaniami, przez co nie są możliwe do rozwiązania analitycznego (tj. danego funkcją matematyczną). Z tego powodu jedynym sposobem uzyskania wyników jest modelowanie numeryczne, czyli obliczanie rozwiązań równań na podstawie przybliżonych metod zaprogramowanych w formie aplikacji komputerowych, pozwalających na symulacje zdarzeń opisywanych danymi równaniami. Dlatego też w efekcie projektu powstanie oprogramowanie opisujące zjawiska związane z pomiarami przepływu prądu w kropkach kwantowych przy pomocy skanowania kropki ostrzem mikroskopu sił atomowych. Rozpatrywane kropki kwantowe są utworzone w tzw. dwuwymiarowym gazie elektronowym (2DEG), który powstaje na styku dwóch materiałów. Metodologia projektu pozwoli na symulacje warunków do wiadomości w dokładny sposób: w obliczeniach uwzględnimy zaburzenie pochodzące od ostrza mikroskopu skaningowego oraz wpływ elektronów, które należą do gazu elektronowego. Ich potencjał jest w stanie efektywnie zmienić kształt potencjału pochodzącego od ostrza - zmiana ta będzie różna w zależności od położenia ostrza ponad próbką (inny będzie efekt, gdy skanowana będzie kropka kwantowa, a inny, gdy ostrze znajdzie się poza jej obszarem - tj. bezpośrednio nad dwuwymiarowym gazem elektronowym). W projekcie zbadamy kształt tego efektywnego potencjału, ponieważ jest on bardzo istotny w do wiadomości SGM.

W trakcie skanowania ostrze potrafi spowodować przepływ prądu nawet, gdy bez jego obecności kropka kwantowa znajdowałaby się w stanie blokady kulombowskiej. Przepływ prądu będzie więc zależał od położenia ostrza. Odtworzymy mapy prądu w zależności od tego położenia. Jednym z celów projektu jest odtworzenie własności kropek kwantowych na podstawie tych map, w szczególności: rozkładu ładunku wewnątrz nanostruktury.

W eksperymencie możliwe jest przyłożenie do ostrza zmiennego potencjału. Taki przypadek również zostanie przez nas rozpatrzony: dzięki temu przeprowadzimy symulację obrotów spinów w pojedynczej kropce, jak również w podwójnych kropkach kwantowych. Spin elektronu jest to jego wewnętrzna własność, mogąca znajdować się w tylko jednym z dwóch stanów: otóż spin może być skierowany w górę lub w dół. Manipulując spinem elektronów przy pomocy zmiennego potencjału (i w obecności dodatkowego oddziaływania będącego po rednkiem między spinem a zmiennym polem elektrycznym pochodzącym

od ostrza, zwanego oddziaływaniem spin-orbita) może mieć wpływ na stan elektronów, a w szczególności na przepływ prądu.

Podsumowując, projekt ma na celu teoretyczny opis i interpretację zjawisk, zachodzących w trakcie doświadczeń z bramkami skaningowymi na kropkach kwantowych. Teoria dotycząca tej techniki jest słabo rozwinięta, natomiast nasza praca ma w efekcie rozbudować ją.