

Warszawa, dnia 15 czerwca 2023 r.

Igor Bragar
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ PT.

„Dynamika splątania kubitów spinowych opartych na półprzewodnikowych kropkach kwantowych”

Rozprawa doktorska pt. „Dynamika splątania kubitów spinowych opartych na półprzewodnikowych kropkach kwantowych” ma formę tryptyku: oprócz streszczenia wiedzy naukowej o kubitach spinowych, splątaniu i przyczynach jego zaniku, zawartego w rozdziale 1 „Wstęp: Splątanie i kubity spinowe”, i rozdziałów pomocniczych, takich jak rozdział 5 „Wnioski” i dodatek, składa się ona z trzech głównych części: rozdziału 2 „Dynamika zaniku splątania dwóch kubitów, zrealizowanych na pojedynczych spinach elektronów”, rozdziału 3 „Opóźnianie zaniku splątania dwóch kubitów spinowych pomiarami kwantowymi” i rozdziału 4 „Dynamiczne wytwarzanie splątania dwóch kubitów singletowo-trypletowych”. Wszystkie trzy główne części mają wspólny przedmiot badań – zanik splątania dwóch kubitów opartych na spinach elektronów, które są zlokalizowane w kropkach kwantowych (KK) w półprzewodnikowej nanostrukturze (np. w bramkowanych KK wytworzonych w heterostrukturze AlGaAs/GaAs albo w samorosnących KK z InGaAs). Jednocześnie badania, przedstawione w tych rozdziałach, są od siebie niezależne.

W rozdziale 1 „Wstęp: Splątanie i kubity spinowe” streszczam najważniejszą, z punktu widzenia przedmiotu tej rozprawy, wiedzę naukową o formalnym opisie układów złożonych w mechanice kwantowej, podaję definicję stanów splątanych, omawiam podejścia do kwantyfikacji poziomu splątania stanu kwantowego i przytaczam jawne definicje miar splątania, wykorzystywanych w następnych rozdziałach. Reasumuję również wiedzę o kilku doświadczalnych realizacjach kubitów spinowych w półprzewodnikowych KK, zwłaszcza, opisuję konstrukcje kilku typów takich urządzeń oraz możliwości manipulacji spinem elektronu, które one dają. Rozdział ten kończę przeglądem mechanizmów fizycznych, które prowadzą do dekoherencji stanów kwantowych kubitów spinowych.

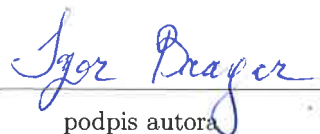
W rozdziale 2 przedstawiam analizę teoretyczną ewolucji czasowej dwóch kubitów, zrealizowanych na pojedynczych spinach elektronów w KK. Pokazano w nim, jak zanika splątanie na skutek oddziaływania kubitów z otoczeniem, składającym się ze spinów jądrowych w KK. Został rozważony wpływ rozmaitych stanów otoczenia (np. stan wysokotemperaturowy, stany zwięzione, stany skorelowane). Zbadana została również wydajność stosowania procedury echa dwukubitowego, mającej na celu odwrócenie defazowania kubitów i przywrócenie stanu splątanego kubitów. Zostało zademonstrowane istnienie granicznej wartości natężenia pola magnetycznego, poniżej której procedura echa nie daje żadnego efektu. Dodatkowo zostało pokazane, że splątanie stanu dwukubitowego, który zanika na skutek oddziaływania nadsubtelnego, może być wykryte i określone ilościowo bez wykonywania tomografii stanu

dwóch kubitów. Ilość splątania w takim przypadku może być wiernie oszacowana pomiarem prostych świadków splątania (rzut na początkowy stan dwukubitowy). Ponadto ten cel może również być osiągnięty pomiarem uśrednionej wierności teleportacji kwantowej, podczas której badany stan jest zużywany.

W rozdziale 3 rozwijam dalej badanie układu dwóch kubitów, zrealizowanych na pojedynczych spinach elektronów w KK, mianowicie, badam, jak można przeciwdziałać zanikowi ich splątania. Pokazuję, że wykonanie procedury manipulacji opartej na wspólnej ewolucji kubitów i ich otoczeń, po której następuje pomiar kwantowy podukładu kubitów, może znacząco opóźnić zanik splątania kubitów. Okazuje się, że istotne jest dobranie parametrów tej procedury (czasu trwania τ swobodnej ewolucji układu, liczby n wykonanych pomiarów kwantowych i ich siły k) w celu zwiększenia efektu opóźniania zaniku splątania. Zostało zademonstrowane, iż efekt może zostać osiągnięty nie tylko w przypadku silnych (rzutowych) pomiarów, ale również dla pomiarów kwantowych o umiarkowanej sile.

W rozdziale 4 skupiam się na dynamicznym wytwarzaniu stanów splątanych dwóch kubitów, każdy z których jest zrealizowany na stanach spinowych dwóch elektronów w podwójnej KK. Zmotywowany doświadczalną realizacją procedury, mającej na celu wytworzenie stanów splątanych kubitów singletowo-trypletowych ($S-T_0$), analizuję wpływ czynników, które ograniczają maksymalnie możliwą ilość splątania wytworzonego w tym układzie, działającym w trybie, gdy energia związana z gradientem pola magnetycznego ΔB_z jest o rząd wielkości mniejsza od energii wymiany J pomiędzy singletem a trypletem. Najpierw badam teoretycznie pojedynczy kubit $S-T_0$ w doświadczeniach swobodnego zaniku indukcji i echa spinowego. Otrzymałem wyrażenia analityczne, opisujące uśrednione wartości poszczególnych składowych kubitów $S-T_0$ jako funkcje czasu trwania procedur dla fluktuacji kwazistatycznych parametru ΔB_z oraz dla fluktuacji kwazistatycznych albo dynamicznych typu $1/f^\beta$ parametru J . Następnie rozpatrzyłem wpływ fluktuacji tych parametrów na wydajność procedury splątującej. Otrzymałem zwłaszcza wyrażenia analityczne operatora gęstości stanu dwukubitowego, które uwzględniają fluktuacje typu $1/f^\beta$ parametrów J_1, J_2 oraz stopień korelacji tych szumów. Te wyrażenia wyznaczają maksymalnie możliwy poziom splątania, wytwarzanego w wyniku wykonania rozważanej procedury splątującej. Teoretyczne oszacowania wskazują na to, że w analizowanym doświadczeniu kubity $S-T_0$ znajdowały się pod wpływem nieskorelowanych szumów ładunkowych typu $1/f^\beta$.

Wyniki przedstawione w rozdziale 2 są opublikowane w czasopiśmie naukowym Physical Review B, 91:155310 (2015) „Dynamics of entanglement of two electron spins interacting with nuclear spin baths in quantum dots” (doi:10.1103/PhysRevB.91.155310), natomiast wyniki zawarte w rozdziałach 3 i 4 nie zostały jeszcze opublikowane.



podpis autora