



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH

Kraków, 29.08.2023

dr hab. inż. Michał Nowak, prof. AGH
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana magistra Igora Bragara zatytułowanej „Dynamics of Entanglement of Spin Qubits Based on Semiconductor Quantum Dots”

Przedłożona rozprawa doktorska przygotowana przez Pana Igora Bragara pod opieką promotora dr. hab. Łukasza Cywińskiego, prof. IF PAN w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie, ma formę monografii zatytułowanej „Dynamics of Entanglement of Spin Qubits Based on Semiconductor Quantum Dots”. Głównym celem rozprawy było teoretyczne przebadanie zaniku splątania pary kubitów opartych na spinowym stopniu swobody elektronów zlokalizowanych w półprzewodnikowych kropkach kwantowych.

Od strony formalnej dysertacja składa się ze streszczenia, wstępu, trzech głównych rozdziałów, podsumowania, rozdziału uzupełniającego oraz list: wystąpień, na których Doktorant prezentował wyniki rozprawy, publikacji, referencji oraz rycin. Przedłożona rozprawa doktorska sporządzona jest w języku angielskim i zawiera streszczenie napisane w języku polskim.

W Rozdziale 1 Doktorant przybliży koncepcję stanów splątanych i pomiaru splątania. Doktorant przedstawia niezbędny formalizm używany do opisu kubitów, definiuje splątanie stanów kwantowych, przedstawia metody określania stopnia splątania i miar splątania, które wykorzystywane są w dyskusji przedstawionej w kolejnych rozdziałach. Kolejną częścią tego rozdziału jest opis układów, w których eksperymentalnie realizowane są kubity spinowe –

kropki kwantowe. Wśród tych układów doktorant przybliży własności planarnych, wertykalnych i samorganizowanych kropek kwantowych. Przedstawiony jest rys historyczny badań nad tymi układami, wraz z rodzajami kubitów, które z ich pomocą mogą zostać zrealizowane. Na uwagę zasługuje fakt bardzo dogłębnego opisu układów planarnych, który nie jest kluczowy dla zrozumienia badań przedstawionych w pracy ale świadczy o szerokiej wiedzy doktoranta dotyczącej nie tylko strony teoretycznej, ale i praktycznej realizacji układów kropek kwantowych. Kolejno Doktorant przedstawia przegląd mechanizmów, które prowadzą do dekoherencji kubitów spinowych, wśród których, jak słusznie zauważa, wiodącą rolę odgrywa sprzężenie z szumiącym otoczeniem elektrycznym mediowane poprzez oddziaływanie spin-orbita oraz sprzężenie ze spinami jądrowymi. Wstęp napisany jest klarownie (co jest istotne w pracy tak głęboko koncentrującej się na teorii opisywanych zjawisk fizycznych) i poparty jest odniesieniami do najistotniejszych pozycji literaturowych.

Rozdział 2 podejmuje zadanie przebadania zjawiska gaśnięcia splątania w układzie dwóch kubitów spinowych z uwzględnieniem różnych stanów jądrowego otoczenia spinowego. Rozważany jest wpływ otoczenia spinów jądrowych (o różnych konfiguracjach – stany wysokotemperaturowe, stany zwężone, stany skorelowane) na gaśnięcie splątania zarówno w przypadku swobodnej ewolucji jak i procedury „echo”, która ma za zadanie odwrócenie defazowania kubitów. Wykazane zostało, że zależność czasowa gaśnięcia dwóch spinowych kubitów względem czasu defazowania T_2^* ma postać uniwersalną, niezależną od szczegółów środowiska spinów jądrowych obu kropek kwantowych. W rozdziale tym Doktorant demonstruje również, że splątanie może zostać przywrócone dzięki dwu-spinowej procedurze echo, jednakże procedura ta skuteczna jest jedynie w dostatecznie wysokich polach magnetycznych (rzędu pola Overhausera). Doktorant demonstruje, że stopień splątania może zostać określony poprzez „świadków” splątania, tj. poprzez projekcję na początkowo splątany stan bądź też wykorzystując protokół teleportacji kwantowej i pomiar jej wierności. Obie te metody pozwalają na uniknięcie wykonywania pełnej tomografii stanu dwukubitowego.

Wyniki tego rozdziału zostały opublikowane w Physical Review B, a artykuł na dzień pisania recenzji cytowany jest 13 razy (baza WoS) co świadczy o tym, że przeprowadzone i opisane w tym rozdziale badania naukowe stoją na wysokim poziomie.

Badania opisane w Rozdziale 3 ponownie dotyczą tematyki pary spinów zlokalizowanych w sprzężonych kropkach kwantowych. Tym razem Doktorant skupia się na opracowaniu metody przeciwdziałającej zanikowi splątania. Doktorant demonstruje, że przy wykorzystaniu metody ewolucji kubitów oddziałujących z otoczeniem spinów jądrowych i następującej po nim serii pomiarów (która dokonuje post-selekcji stanu dwukubitowego) może „cofnąć” gaśnięcie splątania. W rozdziale tym demonstruje również wpływ kluczowych parametrów procedury, które to mogą maksymalizować jej wydajność, tj. dyskutowany jest wpływ parametrów takich jak czas trwania swobodnej ewolucji układu czy siła i ilość wykonywanych pomiarów.

Niestety wyniki z tego rozdziału nie zostały do tej pory opublikowane w żadnym czasopiśmie naukowym, co jest zaskakujące o tyle, że zostały one zawarte w preprincie umieszczonym około dwa lata temu w repozytorium arXiv.

W odniesieniu do tego rozdziału nasuwa mi się następujące pytanie: Doktorant zakłada sprzężenie pomiędzy kropkami silne na tyle, że operatywna jest wymiana spinów elektronowych pomiędzy kropkami. Doktorant zakłada, że funkcje falowe zlokalizowanych w kropkach elektronów przekrywają się. Jakie przybliżenia zostały przyjęte i jakie muszą być odpowiadające im własności rozpatrywanego układu kropek, pozwalające na opis oddziaływania pomiędzy elektronami za pomocą hamiltonianu 3.12 zamiast pełnego opisu kwantowo-mechanicznego uwzględniającego pełny wyraz oddziaływania Coulombowskiego prowadzącego w szczególności do powstania oddziaływania korelacyjno-wymiennego.

Ostatni z głównych rozdziałów pracy, Rozdział 4, poświęcony jest układowi sprzężonej pary kubitów, gdzie każdy z kubitów zrealizowany jest w bazie stanów singlet-tryplet dwóch elektronów zlokalizowanych w sprzężonych kropkach kwantowych. Motywacją Doktoranta jest eksperyment, w którym studiowano ewolucję pary takich kubitów w układzie planarnych kropek kwantowych [Science 336, 202 (2012)]. Autor rozprawy bada czynniki ograniczające możliwe do uzyskania stopień splątania w układzie, gdzie energia związana z gradientem pola magnetycznego jest znacznie mniejsza niż energia wymiany singlet-tryplet. Doktorant bada wpływ fluktuacji gradientu pola magnetycznego i energii wymiany na pojedynczy kubit singlet-tryplet w procedurze swobodnego zaniku indukcji i echa spinowego, by następnie określić wpływ tych fluktuacji na wydajność procedury tworzenia splątania. Wykorzystując stworzony model analizuje wyniki otrzymane w eksperymencie opisanym w pracy Science 336, 202 (2012) i stwierdza, że szum ładunkowy występujący w układzie dwóch kubitów nie

był skorelowany, a główną przyczyną otrzymanego w eksperymencie niskiego stopnia splątania była mała wierność operacji na pojedynczych kubitach. Doktorant przewiduje, że szum energii wymiany o charakterze nisko-częstotliwościowym jest głównym czynnikiem ograniczającym maksymalny stopień splątania.

Wyniki tego rozdziału nie zostały opublikowane, nawet w formie preprintu. Uważam, że skoro opracowany model pozwala odnieść się w wiarygodny sposób do istotnych prac eksperymentalnych powinno to mieć miejsce, szczególnie biorąc pod uwagę intensywnie postępujące prace w tej dziedzinie.

W kolejnej części rozprawy Doktorant podsumowuje najważniejsze osiągnięcia swojej pracy. Następuje po niej rozdział dodatkowy, który zawiera uzupełnienia części teoretycznej pracy. Rozprawę kończy (bogata) lista wystąpień konferencyjnych, publikacji oraz referencji.

Sama dysertacja napisana jest starannie i zawiera jedynie nieliczne omyłki pisarskie. Z uwagi na podjętą tematykę badań, nie jest jednak łatwa w lekturze dla osoby na co dzień nie zajmującej się opisywanymi zagadnieniami. W tym kontekście szkoda, że autor nie pokusił się o zobrazowanie niektórych koncepcji, bądź wyników za pomocą rysunków (np. ułożenie stanów i ich ewolucja na sferze Blocha, widma kilkuelektronowe i obsadzenia stanów poszczególnych kropek, eksperymentalne realizacje opisywanych układów kropek kwantowych, itp.). Nie zmienia to jednak faktu, że przedstawiona rozprawa, w szczególności dzięki rozbudowanemu wstępowi, **prezentuje ogólną wiedzę Doktoranta**, zarówno z dziedziny mechaniki kwantowej, fizyki ciała stałego jak i elementów teorii informacji kwantowej.

Cel rozprawy doktorskiej jest w rozprawie dobrze określony i konsekwentnie zrealizowany. Tematyka, której dotyczy praca jest ciekawa i aktualna. Opis dynamiki splątania kwantowego kubitów spinowych, realizacji i podtrzymywania splątania w sprzężonych kropkach kwantowych przedstawiony w rozprawie stanowi **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Przedstawiona rozprawa i uzyskane przez Doktoranta wyniki **świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta**. Jest to również odzwierciedlone w liście autorów opublikowanego artykułu i preprintu.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że rozprawa doktorska Pana magistra Igora Bragara spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim.

Wnoszę o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania i publicznej obrony rozprawy doktorskiej

Michał Nowak

