

Streszczenie

Praca traktuje o zjawiskach związanych z zależnym od spinu transportem elektronowym występującym w kropkach kwantowych, będących w tunelowym kontakcie z elektrodami z metalu normalnego, ferromagnetycznego lub w kontakcie z nadprzewodnikiem. Przeprowadzone analizy teoretyczne tłumaczą wyniki eksperymentalne dla przewodnictwa różniczkowego dI/dV kropek kwantowych w niskich temperaturach i silnych polach magnetycznych uzyskane w dwóch renomowanych zagranicznych ośrodkach naukowych: w RIKEN (Japonia) pod kierunkiem prof. K. Ishibashi oraz w IBM Almaden (USA) pod kierunkiem prof. S. S. P. Parkina.

Wyjaśniamy złożony sygnał w przewodnictwie dla kropki kwantowej wykonanej z nanorurki węglowej sprzężonej do elektrod ze zwykłego metalu w zakresie blokady kulombowskiej w której na dwóch najwyższych (położonych najbliżej poziomu Fermiego) orbitalach znajdują się w sumie dwa elektrony. W formalizmie rachunku zaburzeń drugiego rzędu uwzględniamy elastyczne i nieelastyczne kotunelowanie elektronów przez układ poziomów singlet-tryplet, z możliwością przechodzenia układu między tymi stanami. Pokazujemy, że można wywołać zmianę stanu magnetycznego układu, zmieniając jedynie napięcie bramki. W modelu, w którym występuje asymetria sprzężeń orbitali nanorurki do elektrod pojawia się efektywna asymetria spinowa, gdyż orbitale różnią się indeksami spinowymi. Przekłada się to na efektywną polaryzację spinową sprzężeń pomiędzy elektrodami a nanorurką analogicznie do kropki sprzężonej z elektrodami ferromagnetycznymi, gdzie asymetria spinowa pojawia się w sposób naturalny w wyniku zależnej od spinu gęstości stanów. Wartość efektywnej polaryzacji spinowej może być modyfikowana i kontrolowana przez napięcie na bramce przy pomocy pola elektrycznego. Z wyników teoretycznych w bardzo dobrej zgodności z wynikami eksperymentalnymi, wnioskujemy obecność silnej relaksacji układu do stanu o niższej energii spinowej i orbitalnej.

Zaobserwowano fakt, że w planarnych makroskopowych magnetycznych złączach tunelowych (MTJ) z warstwą magnetycznych nanokropek CoFe umieszczonych wewnątrz bariery tunelowej wykonanej z krystalicznego MgO, dla niskich napięć transportowych możliwe jest zaobserwowanie anomalii (ZBA) w przewodnictwie w postaci pików pojedynczego lub rozszczepionego. Badając zależności temperaturowe wysokości pików ZBA pokazujemy, że pik pochodzi od efektu Kondo. Pik Kondo jest rozszczepiony lub pojedynczy w zależności od konfiguracji magnetyzacji elektrod ferromagnetycznych, odpowiednio równoległej lub antyrównoległej. W niektórych próbkach obserwujemy także zależność wielkości rozszczepienia pików od pola magnetycznego. Stosując model Andersona dla magnetycznej kropki kwantowej pokazujemy, że rozszczepienie pików jest związane z oddziaływaniem wymiennym z ferromagnetycznymi elektrodami, które renormalizuje położenia poziomów spinowych. Obliczenia wykonano standardową metodą równań ruchu (EOM) dla funkcji dla Greena kropki kwantowej, gdzie renormalizację poziomów policzono w sposób samozgodny.

Badamy także współobecność efektu nadprzewodnictwa, magnetyzmu i efektu Kondo w planarnych złączach tunelowych z nanokropkami CoFe sprzężonymi do nadprzewodzących elektrod poprzez bariery tunelowe z krystalicznego MgO. Efekty związane z nadprzewodnictwem elektrod wykonanych z Al w stanie nadprzewodzącym, generują w przewodnictwie różniczkowym nanoziaren CoFe wyraźny sygnał nałożony na pik po-

chodzący z efektu Kondo. Argumentujemy, że w wypadku, gdy przerwa energetyczna w nadprzewodniku jest dużo węższa niż energia odpowiadająca temperaturze Kondo układu, jak w układzie z Al, $\Delta_{\text{Al}} \ll k_{\text{B}}T_{\text{K, Al}}$, chmurę elektronów Kondo można potraktować w obrazie cieczy Fermiego jako szeroki kanał przewodnictwa. Efektu Kondo nie zaobserwowano jednak w eksperymencie z NbN w stanie nadprzewodzącym, gdzie szerokość przerwy jest znacznie większa niż energia odpowiadająca temperaturze Kondo układu, $\Delta_{\text{NbN}} \gg k_{\text{B}}T_{\text{K, NbN}}$. W układzie tym pojawia się natomiast inny nietrywialny efekt obserwowany w sygnale przewodnictwa: dla każdego znaku napięcia widoczna jest struktura pików podwójnego. Jest ona najwyraźniejsza w zerowym polu magnetycznym, a ze wzrostem pola magnetycznego zanika, bez wyraźnej zmiany położenia pików. Tłumaczymy zjawiska te z użyciem dwu-domieszkowego (*two-impurity*) modelu Andersona dla dwóch oddziałujących kropek kwantowych (nanoziaren CoFe) z możliwością powstawania układu poziomów singlet-tryplet i przejść między tymi stanami w wyniku nieelastycznego kotunelowania elektronów. Pik dla niższych napięć jest związany z kotunelowaniem elastycznym, a pik dla wyższych napięć jest związany z kotunelowaniem nieelastycznym i wzbudzeniami w układzie. Uwzględniliśmy także złożoną zależność kształtu gęstości stanów nadprzewodzących w cienkich warstwach NbN od zewnętrznego pola magnetycznego. Uzyskaliśmy bardzo dobrą zgodność wyników teoretycznych z eksperymentalnymi.

Podsumowując, niniejsza praca przyczynia się do zrozumienia zależnych od spinu elektronowego procesów zachodzących przy przepływie prądów elektrycznych przez trzy typy układów z kropkami kwantowymi sprzężonymi do elektrod z normalnego metalu, z metalu ferromagnetycznego oraz do nadprzewodnika. Wśród omawianych zjawisk najważniejszą rolę odgrywają oddziaływania ferromagnetyczne, przejścia pomiędzy różnymi stanami elektronowymi kropek, a także wpływ na przewodnictwo efektu Kondo, nadprzewodnictwa elektrod i zewnętrznych pól magnetycznych. Uważamy, że zaprezentowane wyniki mogą wnieść wkład w rozwijającą się dziedzinę spintroniki.