

Bírálati értékelés Csonka Szabolcs „Mesterséges atomokból felépülő hibrid kvantumáramkörök” MTA doktori értekezéséről.

A dolgozat célja alapvető kvantumjelenségek vizsgálata, mint pl. spin-pálya kölcsönhatás, alagúteffektus lehetséges mechanizmusai kvantumpöttyök és szupravezető közt. Távlati cél olyan topologikus szupravezető rendszerek létrehozása, melyek természetes közegei lehetnek a Majorana fermionoknak, amelyek ígéretesek a kvantumszámítógépek hibamentes működéséhez. A dolgozat végigvezeti az olvasót egy fejlődési folyamaton, mely az InAs nanopálcákra megvalósított mesterséges atomtól, ill. annak ferromágneses/szupravezető elektródával való kölcsönhatásától indul. A folytatásban mesterséges atomok közé iktatott szupravezető teremt közöttük kapcsolatot, és a csatolás jellegétől függően Cooper-pár szétválasztót vagy Andrejev molekulát valósít meg. A folyamat az Andrejev-molekula dupla pálcában történő megvalósításában csúcsosodik ki, ahol 10-20nm vastag Al szupravezető csatolja össze az InAs pálcákat.

Példaértékű, hogy a jelölt a tudományos eredményeit főként Magyarországon végzett kutatómunkával érte el a Budapesti Műszaki Egyetemen, ahol korszerű kriotechnikai és kvantumelektronikai labort épített fel, jelenleg tanszékvezető. Kivette részét az utánpótlás nevelésben is: 10 doktorandusz témavezetője volt. Az együttműködő partnerei közt előkelő helyen említi az EK-MFA tisztalabort, valamint a Bazeli Egyetemet.

A jelölt publikációs tevékenysége kiemelkedő. A szakterület vezető folyóiratai (Phys. Rev. Letters, Nano Letters, Nanoscale...) mellett egy-egy Nature és Nature Communications cikk is szerepel a listában, ami a Cooper-pár szétválasztó és az Andrejev molekula jelentőségének és újdonság értékének köszönhető. A tézispontokhoz kapcsolódó 16 cikkből 11-ben utolsó, 2-ben első szerző. Közleményeire több mint 2200 hivatkozás érkezett (MTMT).

Konkrét kérdések, észrevételek:

1. Formai/nyelvi hiányosságok: A „formálás” kifejezést többször is használja különféle szerkezetek kialakítása/létrehozása helyett. Pl. 1.1 fejezet címe „*Mesterséges atomok formálása nanopálcák nedves marásával*”. Feltehetően az angol szakirodalomból átvett szófordulat, de a „kioptimalizál” (téziszfüzet 3. oldal) kifejezést ezzel se tudtam magyarázni. A dolgozatban viszonylag gyakoriak a gépelési hibák is (kb. 20; pl. „topológia”, „Coooper-pár”), általában nem értelemzavarók. A 3.1 fejezetben több helyen is 8 ábra helyett 9-re hivatkozik.

2. Miért InAs nanopálca? A téziszfüzetben szerepel, hogy erős a spin-pálya kölcsönhatás, ami számos kvantumelektronikai alkalmazás szempontjából fontos tulajdonság. E mellett még milyen tulajdonságok fontosak (pl. kis tiltott sáv: 0.35eV; direkt tiltott sáv...)? Említ kevésbé sikeres irodalmi kísérleteket InSb-on [71]. A 4.6. fejezetben említi, hogy „*Több különböző nanoszerkezetből sikerült azóta CPS eszközt készíteni: InAs félvezető nanopálcák mellett szén nanocsövekből [107, 108], grafénből [109, 110, 111], dupla félvezető pálcákból [112], fémcsigetekből [113, 114] és kétdimenziós elektrongázokból is [115].*” Kérem, értékelje, hogy ezek az anyagok/rendszerek mely tulajdonságuk miatt alkalmasak, ill. ígéretesek!

3. 2.2 fejezetben „*A kísérletben a mesterséges atom mérete $\approx 300\text{nm}$ volt, a pálcában a szabad úthossz $l_e \approx 80\text{ nm}$, míg a spin-pálya hossz $l_{SO} \approx 130\text{ nm}$, ...*” Ezek az adatok (l_e , l_{SO}) a T4 cikkben szerepelnek a T9 cikkre hivatkozva, ahol viszont egyáltalán nincs szó ezekről a mennyiségekről. Hogyan határozta meg, ill. mit jelentenek ezek a mennyiségek, figyelembe véve, hogy az elektronok szabad úthossza orientációfüggő? Mit mondhatunk e tekintetben a spinpálya hossza? A dolgozathoz nem derül ki, hogy a nanopálca milyen orientációjú, ill. egykristály-e, vagy polikristályos. Lehetne-e amorf anyag a nanopálca?

4. A 2.2 fejezetben „g-faktort a Kondo-effektus [18] segítségével határozta meg, az 5.b ábrán mutatja be a Kondo-rezonancia Zeeman-felhasadását B térben, amikor a mesterséges atomon *páratlan* elektron található. A 2.3 fejezetben olvashatjuk: „A csatolt kétspin rendszer úgy hozható létre, hogy a mesterséges atomok legfelső elektron állapotába 1-1 elektront helyezünk.” Mely paraméterekkel szabályozható, ill. tartható stabilan a mesterséges atomban vagy kvantumpöttyben tartózkodó elektronok száma? Később a Cooper-pár szétválasztó kapcsán a 4.5 fejezetben említ töltésetektort. Milyen elven képes akár 1-2 elektront detektálni?

5. 5. fejezet: „Cooper-pár szétválasztó áramkör akkor működik hatékonyan, ha a QD-S-QD rendszer erősen van csatolva a normál elektródákhoz és így a szétválasztott párok el tudják hagyni a pöttyöket mielőtt újabb pár érkezik. Ebben a fejezetben az ellenkező határesetet fogjuk vizsgálni, amikor a normál elektródákat leválasztjuk, és a szupravezető és a kvantumpöttyök közötti hibridizáció erős. Ezt a rendszert hívjuk Andrejev-molekulának”. A Cooper-pár szétválasztót és az Andrejev-molekulát különböző geometriájú kvantumáramkörrel valósítja meg. Létrehozható-e olyan geometria, amely egyaránt működtethető Cooper-pár szétválasztóként és Andrejev-molekulaként a kapufeszültségek vezérlésével? (Pl. 15. ábra b paneljében bemutatott áramkör hangolható-e a kapuelektródák vezérlésével a kvantumpöttyök helyzete/kiterjedése úgy, hogy a szupravezetővel erős legyen a hibridizáció?)

6. 5.1 fejezetben meghatározta az Andrejev állapot kiterjedését ($\sim 100\text{nm}$), majd megállapítja, hogy standard litográfiai technikákkal, $50 - 100\text{nm}$ távolságban elhelyezett QD-k között megvalósítható. Visszatekintve logikus, utólagos visszaigazolása annak, hogy amit „megvalósítottunk az megvalósítható”, de lehetett-e ezt előre tudni, hogy milyen méretezés szükséges az Andrejev molekula megvalósításához?

7. 5.1 fejezet: Az Andrejev molekulában a szupravezető „rendezetlen ólom”. Mit jelent a szerző szóhasználatában a *rendezetlen*? Valószínűtlennek tartom, hogy amorf szerkezetű lenne az (egykomponensű fém) ólom szupravezető. A $20\text{-}40\text{nm}$ -es koherenciahossz is inkább arra utal, hogy polikristályos. (Amorf szupravezetőknél inkább $<10\text{nm}$.) Milyen szerepe van az ólom szupravezető *rendezetlenségének* a kvantumáramkör működése szempontjából?

8. A kísérletek többségét 10mK környékén (sokkal a kritikus hőmérséklet alatt) végezte. A Cooper-pár szétválasztó kapcsán említi, hogy a nemlineáris jel 200mK -en eltűnik. Miért csak ennyivel a kritikus hőmérséklet alatt működnek a kvantumáramkörök? Reális, hogy az ismertetett áramköri elemeken alapuló kvantumszámítógépek ilyen speciális kriotechnikai körülmények közt fognak működni? Lát-e lehetőséget arra, hogy hasonló jelenségeket magasabb hőmérsékleten is megfigyeljünk? Megvalósíthatók-e ezek a kvantumáramkörök magas kritikus hőmérsékletű szupravezetőkkel? Jelent-e elvi korlátot a kisebb koherenciahosszuk ill. anizotrópiájuk?

Összefoglalva, az értekezésben a jelölt egy nagyon magas színvonalú kutatómunka eredményeit foglalja össze, melyek bőségesen teljesítik az MTA doktora cím követelményeit. Az eredmények (tézisek) a jelölt saját tudományos eredményeinek tekinthetők. A dolgozathoz kapcsolódó közlemények kiemelkedő színvonalúak. Mindezt figyelembe véve javaslom a dolgozat nyilvános vitára bocsátását és az MTA doktora cím odaítélését.

Budapest, 2024. 11. 28.

Czigány Zsolt, MTA doktora
tudományos tanácsadó (EK-MFA)