

Válasz

Czigány Zsolt bíráló kérdéseire

Köszönöm a bíráló munkáját és értékes észrevételeit! Az alábbiakban válaszolok a feltett kérdésekre.

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!

InAs nanopálcák használata kvantum elektronikai áramkörök készítésére az erős spin-pálya kölcsönhatáson túl több kedvező alap tulajdonságuk miatt terjedt el:

- Az InAs könnyen kontaktálható félvezető, ami Schottky-gát nélküli határfelületet ad a legtöbb fémmel. Ennek köszönhetően a szupravezető-félvezető határfelület nagy lesz a transzmisszió, a szupravezetés hatékonyan be tud hatolni a félvezetőbe. A megfelelő kontaktálás jóval nehezebb pl. InSb esetén.

- A pálca keresztmetszete mentén automatikusan rendelkezésre áll a bezáró potenciál.

- A töltéssűrűség megfelelően kicsi, hogy lokális kapuzással bezáró potenciált lehessen létrehozni kvantum pöttyök számára, ahol a pöttyök és az elektródák közötti alagútátmenet értéke beállítható a kívánt tartományba.

A felsorolt további anyagok, melyekből CPS eszköz született különböző célokra ideálisak: Ha CPS-t alkalmaznánk távolabbi spin qubitek összekapcsolására, akkor a szén alapú rendszerek tűnnek kedvezőnek, ahol magspin mentes rendszert lehet készíteni. Grafén ill. más kétdimenziós elektronrendszerből készített CPS előnye, hogy összetettebb áramkörök csatolhatóak a kvantum pöttyökhöz az egy dimenziós architektúrához képest. Az InAs és InSb rendszerekben a spin-pálya kölcsönhatás segíthet, hogy topológikus szupravezető rendszereket lehessen létrehozni.

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 dolgozatból nem derül ki, hogy a nanopálca milyen orientációjú, ill. egykristály-e, vagy polikristályos. Lehetne-e amorf anyag a nanopálca?

A T4 publikációban l_e és l_{so} értékére irodalmi adatot használtunk a T4 cikkben szereplő 19. hivatkozás alapján (Fasth et al., D. Phys. Rev. Lett. 98, 266801 (2007)). Ezen értékeket később kísérleteileg magunk is becsültük transzkonduktancia görbék kiértékeléséből [Liang et al. Phys. Rev.

B 81, 153304 (2010) alapján], valamint gyenge-lokalizációs mérések illesztéséből [T3, A. E. Hansen et al. Phys. Rev. B 71, 205328 (2005)]. Természetesen a szabad úthossz orientáció függő a pálca sugárirányú bezáró potenciálja miatt. A transzkonduktanciából származó I_e a pálca transzport irányú (pálca tengelye irányú) szabadúthosszát adja. Az I_{SO} származtatásánál 1 dimenziós gyenge-lokalizációs modellel illesztettük a magnetotranszport görbéket, a kapott mennyiség a spin-pálya kölcsönhatás következtében létrejött spin relaxációt jellemzi, azt a hosszt, amin a pálca hossztengelye mentén haladva az elektron spin információja elvész.

Az MBE-vel növesztett nanopálcák egykristályok, esetünkben wurtzit kristályszerkezetűek, de létezik zinkbland kristályszerkezetű InAs nanopálca is (mindkettő hexagonális szoros pakolást jelent, ABAB ill. ABCABC rétegekkel). A mai pálcákban csak egy-egy kristálysík hiba fordul elő mikrométeres távolságon. Külső behatással lehet ezen pálcákat amorffá tenni.

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 kétszín 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 töltésdetektort. *Milyen elven képes akár 1-2 elektront detektálni?*

Mesterséges atomban az elektronok szám kapufeszültség segítségével állítható be. Normál atomhoz hasonlóan a mesterséges atomok bezáró potenciáljában is diszkrét energianívók találhatóak. Ezek helyzetét a külső kémiai potenciálhoz képest kapuelektrodára kapcsolt feszültséggel tudjuk változtatni: pozitív feszültséggel a gödör mélységét növeljük, így a nívók energiája lefelé tolódik. A feszültséget növelve eljutunk arra a pontra, mikor energetikailag kedvezőbb lesz a mesterséges atomra egy újabb elektront rátenni. Ezen Coulomb-rezonanciáktól kell távol maradnunk, ha az elektron számot stabilan akarjuk a mesterséges atomban tartani. Töltés detektorok elektrosztatikus elven alapulnak. Az egyik megvalósításuk egy kvantum pontkontaktus létrehozása a mesterséges atom közelében. Ha az elektronszám megváltozik eggyel az atomban, ezen lokalizált elektron taszító potenciálját érezni fogják a pontkontaktuson áthaladni kívánó elektronok, ami a kontaktus vezetőképességének csökkenésével jár. Így amikor a mesterséges atom kapufeszültségének függvényében az elektronszám megváltozik, a pontkontaktus áramának hirtelen csökkenésével ez a változás észlelhető. Ezzel a módszerrel egyesével le lehet számolni, ahogy elektronokkal feltöltjük a mesterséges atomot.

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 kapuelektrodák vezérlésével a kvantumpöttyök helyzete/kiterjedése úgy, hogy a szupravezetővel erős legyen a hibridizáció?)

Igen, létrehozható ilyen geometria. Például a párhuzamos nanopálca elrendezés, - ahol az Andrejev-molekulát kimutattuk [T16] -, CPS-ként is tudtuk működtetni (lásd: Kurtossy et al., NaturePJ Quantum Materials 7, 88 (2022)).

A 15.b ábra geometriája annyival rosszabb, hogy 150-200nm választja el a két mesterséges atomot, ami a szupravezetőn keresztüli hibridizációt lecsökkenti a párhuzamos pálca geometriához képest.

6. 5.1 fejezetben meghatározta az Andrejev állapot kiterjedését (~100nm), majd megállapítja, hogy standard litográfiai technikákkal, 50 – 100nm 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?

Az 5.1 fejezetben bemutatott kísérletben molekulát még nem valósítottunk meg, egyetlen atom Andrejev-állapotának kiterjedését vizsgáltuk meg, ami a korábbi munkákhoz képest lényegesen nagyobbak adódtak. Ezen kísérlet tapasztalatai alapján feltételeztük azt, hogy elegendő hibridizáció jöhet létre két atom között, hogy molekuláris állapot megfigyelhetővé váljon. Az ellentmondó elméleti jóslatok miatt, nem lehetett tudni, hogy milyen méretezés szükséges, ezért próbáltunk olyan geometriát, ahol a két atom közötti távolság minimális. Ehhez tűnt a duplapalcás elrendezés ideálisnak [T16].

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 20-40nm-es koherenciahossz is inkább arra utal, hogy polikristályos. (Amorf szupravezetőknél inkább <10nm.) Milyen szerepe van az ólom szupravezető *rendezetlenségének* a kvantumáramkör működése szempontjából?

A szóhasználat nem volt pontos. Arra utalt, hogy nem egykristály rétegről van szó. Ezen kísérletben nem az ólom rendezetlenségének, hanem relatív nagy szupravezető tiltotsávjának volt szerepe. A korábbi kísérletekben alkalmazott alumínium szupravezetőhöz képest sokkal nagyobb energiaablakot biztosított a tiltotsáv az Andrejev-kötött állapotok vizsgálatára.

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 ismertett 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?

A Cooper-pár szétválasztó nemlokális jelének eltűnése lényegesen a szupravezető átalakulási hőmérséklet alatt, egy nem megértett jelenség.

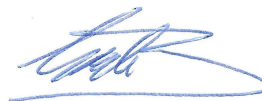
A kísérletekben alkalmazott 10mK környéki hőmérséklet tipikus a kvantumelektronikával foglalkozó közösségben. Napjainkban elérhető, szupravezető qubit alapú kvantumszámítógépek (pl. az IBM felhőből elérhető gépe) mind ilyen hőmérsékleten működnek. Ezen körülmények létrehozása a mai kriotechnológiával rutinszinten, hosszútávon megoldható. Kvantumelektronikán

alapuló processzorok esetében a minél alacsonyabb üzemeltetési hőmérséklet a jövőben is fontos lesz, hiszen a processzorban meglévő összes olyan gerjesztést, ami koherencia veszteséget idézhet elő (pl. rácsrezgések, fotonok) meg kell próbálni minimalizálni.

Magas kritikus hőmérsékletű szupravezetők alkalmazása CPS eszközben egy érdekes felvetés. Az áramkört geometria megvalósításában kihívást jelenthet a kis koherenciahossz, aminél kisebb távolságra kellene a mesterséges atomokat a szupravezetőhöz csatolni. Napjainkban magas hőmérsékletű szupravezetőkből, akár egy elemi cella vastag réteget is le tudnak választani, ennek pl. két oldalához lehetne a mesterséges atomokat csatolni. Konceptcionálisan problémát okozhat, hogy a tiltott sáv adott irányokban eltűnik, így az első elektron kivételét követően a pár másik elektronja energiaköltség nélkül a szupravezetőben maradhat, lecsökkentve a párszétválasztás hatékonyságát.

Köszönettel:

Aachen, 2025. 07. 03.



Csonka Szabolcs

BME Fizika Tanszék