

PhD Tézisfüzet

Szupravezető dupla kvantumpötty hibridek párhuzamos InAs nanopálcákban

Kürtössy Olivér Csaba

Témavezető: Dr. Csonka Szabolcs
egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Fizika Tanszék
2024



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Bevezetés

Napjainkban a kvantumelektronika intenzíven vizsgál különböző fizikai rendszereken alapuló kvantumbit koncepciókat, például spin kvantumbiteket, vagy különféle szupravezető kvantumbiteket. Általánosságban elmondható, hogy a legnagyobb kihívást ezen kvantumbitek külső zajokra való érzékenységük jelenti, amelyek számítási hibákhoz és koherenciavesztéshez vezetnek. A probléma kezelésére egy ígéretes megoldás lehet A. Kitaev által javasolt anionok alkalmazása. Egydimenziós láncmodellje szupravezetők és a hozzájuk kapcsolt atomok kölcsönhatásából ún. Majorana fermionok megjelenését jósolja, amelyek topologikusan védettek a külső környezeti inhomogenitásokkal szemben. A védelemnek köszönhetően ideális jelöltek a hibamentes kvantumszámítások logikai műveleteinek elvégzéséhez, ami jelentős előnyt jelent a hagyományos kvantumszámítógépekhez képest.

Az elmúlt években számos kutatás vizsgálta a Majorana fermionok realizációját szupravezetőhöz csatolt félvezető nanopálcákban. Ezekben a rendszerekben a szupravezetés, a mágneses tér, és a spin-pálya kölcsönhatás összjátékának eredményeként várták a Majorana fermionok megjelenését. Ugyan spektroszkópiai mérésekben jelentették a Majorana típusú gerjesztések jeleit, ezek eredetéről máig nincs konszenzus a tudományos közösségben. Mindemellett komoly limitáló tényező volt a rendszer néhány kontrollparaméterének hiánya (például kémiai potenciál).

A Majorana fermionok kísérleti megvalósításához alternatív platformként szolgál egy kvantumpöttyökből (mesterséges atomokból) és szupravezetőkből álló egydimenziós lánc (Kitaev lánc). A kvantumpöttyök energiaszintjeinek és az elektronlagutazási folyamatok hangolhatósága lényegesen nagyobb kísérleti kontrollt ad a rendszerben, lehetővé téve a Majorana fermionok megvalósításához szükséges beállítások elérését.

A Kitaev lánc fő építőeleme egy közös szupravezetővel összekapcsolt dupla kvantumpötty, amely elméleti jóslatok alapján produkálhatja a Majorana statisztikájú gerjesztések megjelenését. Ebben a redukált rendszerben tanulmányozhatóvá válnak a kvantumpöttyök közötti hibridizációs folyamatok, azok szupravezetőn keresztüli kölcsönhatása, amelyek biztosítják a láncon belüli hosszútávú kölcsönhatás fenntartását. A kölcsönhatás vizsgálható többféle határesetben, melynek különböző megnyilvánulásai lehetnek: gyenge csatolás esetében Cooper pár szétválasztás, erős interakciónál pedig egy ún. Andrejev molekuláris állapot alakítható ki a kvantumpöttyökön. Amennyiben sikerül ezen folyamatok hatását feltérképezni, azokat kontrollálni, a rendszer integrálhatóvá válik egy hosszabb láncba, amelyben a topologikusan védett Majorana állapotok a lánc végén megjelennek.

Célkitűzések

A PhD alatt elvégzett kutatómunka és a tézis célja a bevezetőben vázolt, közös szupravezetőhöz csatolt párhuzamos kvantumpötty rendszer viselkedésének kísérleti vizsgálata különböző határesetekben. A kísérletekben párhuzamos InAs nanopálcákból felépülő áramköröket vizsgálok, melyekben a pálcákat egy epitaxiális szupravezető köti össze. Ennek a geometriának köszönhetően a pálcákban kialakított kvantumpöttyök közötti kölcsönhatás erőssége - a kvantumpöttyök fizikai közelsége nyomán - maximalizálható.

A kvantumpöttyök és a szupravezető közti gyenge csatoláskor a rendszer transzportját Cooper pár szétválasztás dominálhatja. Azonban a kvantumpöttyök közelsége miatt jelentőssé válik az azok közötti erős Coulomb taszítás, amely korlátozza a párszétválasztó folyamatokat. A tézis egyik célja a két jelenség versengésének bemutatása és kvantifikálása. A kedvezőtlen Coulomb taszítás ellenére a kvantumpöttyökön keresztül folyó áram korrelációinak mérésével bemutatom hatékony Cooper pár szétválasztás jelenlétét.

Az erősen csatolt határesetben a kvantumpöttyök a szupravezetővel közösen ún. Andrejev kötött állapotokat alakítanak ki. Mivel az általam vizsgált rendszerben a kvantumpöttyök ugyanazon szupravezetővel alakítanak ki kötött állapotokat, ezek hibridizálhatnak, ún. Andrejev molekulát hoznak létre. A tézis egyik másik fő célkitűzése egy hangolható Andrejev molekuláris állapot spektroszkópiai mérésekkel történő reprezentálása, amelyeket numerikus szimulációkkal is összevetek.

A szupravezető-dupla kvantumpötty hibrid vizsgálható egy olyan, harmadik limitben is, amikor a szupravezető elektródát egy véges méretű, szintén kvantumpöttyként viselkedő szupravezető sziget helyettesíti. Ilyenkor a kvantumpöttyök a sziget elektronjain keresztül egy olyan mesterséges, 3 atomos molekulát alakítanak ki, amelynek centrális atomján szupravezető korrelációk uralkodnak. A tézisben a szupravezető sziget elektronszámfüggő spektrumának vizsgálatával igazolom a 3 atomos molekula jelenlétét, amelyeket egyszerű számításokkal is alátámasztok.

Tézispontok

- 1. Nagy hatásfokú Cooper pár szétválasztást detektáltam erős Coulomb kölcsönhatás jelenléte mellett.** Egy dupla InAs nanopálcákon alapuló áramkörben a pálcák mellé telepített kapuelektroda sorral elektrosztatikusan párhuzamos kvantumpöttyöket hoztam létre. A kvantumpöttyöket egyik irányból egy közös szupravezető elektródához csatoltam, míg a másik irányból egy-egy normál fém elektródán keresztül vizsgáltam a kvantumpöttyökön keresztüli Cooper pár felhasítást transzportmérésekkel. Az általam kialakított áramkör a kvantumpöttyök geometriai közelsége a korábbi, simpla nanopálcás Cooper pár feltörőkhöz képest nagyobb hatékonyságú pár szétválasztást tesz lehetővé. Ugyanezen okból kifolyólag azonban jelentős Coulomb taszítás is megjelenik, amely elnyomja a folyamatot. A Coulomb taszítás hatását elemeztem, a mérésekben a korábbi InAs nanopálcákon végzett kísérletekhez képest jelentősen nagyobb hatásfokú Cooper pár feltörést tapasztaltam annak jelenlétében is. Elméleti számításokkal összevetve a kísérleti eredményeimet, elmondható, hogy a párhuzamos pálcákból álló geometria előnyösebb. (T1)
- 2. Létrehoztam egy 2 atomos Andrejev molekulát egy szupravezetővel összekapcsolt párhuzamos kvantumpötty rendszerben.** Dupla InAs nanopálcákba ágyazott, szupravezető elektródákhoz kapcsolt párhuzamos kvantumpöttyökben kísérletileg kimutattam két Yu-Shiba-Rusinov kötött állapot kereszt Andrejev reflexión és elasztikus alagutazáson alapuló hibridizációját. Megvizsgáltam a rendszer együttes gerjesztési spektrumát a kvantumpöttyök energiaszintjeinek hangolása mellett, amelyben rávilágítottam a különböző kölcsönhatásokból (pl. kapacitív csatolás, kereszt Andrejev reflexió) származó spektrális sajátosságokra. Az Andrejev molekula jelenlétének igazolásához a kísérleti eredményeket numerikus szimulációkkal is összevetettem, amelyek reprodukálták a spektrum legfőbb tulajdonságait. (T2)
- 3. Egy szupravezető szigethez kapcsolt két mesterséges atom interakciójával megalkottam egy 3 atomos Andrejev molekulát.** Egy többterminálú, dupla InAs nanopálcából álló áramkörben feltérképeztem egy szupravezető sziget és egy hozzácsatolt párhuzamos kvantumpötty-rendszer kölcsönhatását. A sziget és a félvezető kvantumpöttyök energiaszintjeinek finomhangolásával Coulomb asszisztált Yu-Shiba-Rusinov kötött állapotokat hoztam létre, amelyeket a sziget elektronszámfüggő stabilitás diagramjában detektáltam. A szupravezető sziget rezonanciájának távolságát vizsgálva kimutattam, hogy ha a szupravezető szigeten egy kvázi részecske található, a kvantumpöttyök egy-egy elektronja ugyanezen kvázi részecskével alakít ki kötést, megosztva azt egymásközt. Ez egy olyan 3 atomos, mesterséges Andrejev molekulát jelent, melynek

középső atomján szupravezető korrelációk uralkodnak. (T3)

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- (T1) **Kürtössy, O.**, Scherübl, Z., Fülöp, G., Lukács, I., Kanne, T., Nygård, J., Makk, P., Csonka, S.: *Parallel InAs nanowires for Cooper pair splitters with Coulomb repulsion*, Nature PJ Quantum Mater. 7, 88 (2022), IF: 7.14
- (T2) **Kürtössy, O.**, Scherübl, Z., Fülöp, G., Lukács, I., Kanne, T., Nygård, J., Makk, P., Csonka, S.: *Andreev molecule in parallel InAs nanowires*, Nano Lett. 21, 19, 7929–7937 (2021), IF: 11.62
- (T3) **Kürtössy, O.**, Bodócs, M., Scherübl, Z., Kanne, T., Nygård, J., Makk, P., Csonka, S.: *Polyatomic Andreev molecule in a superconducting island-double quantum dot hybrid*, manuscript under preparation (2024)

Egyéb publikációk

- (1) Elalaily, T., **Kürtössy, O.**, Zannier, V., Scherübl, Z., Lukács, I., Rossi, F., Srivastava, P., Sorba, L., Csonka, S., Makk, P.: *Probing proximity induced superconductivity in InAs nanowire using built-in barriers*, Phys. Rev. Applied 14, 044002 (2019), IF: 4.53
- (2) Elalaily, T., **Kürtössy, O.**, Scherübl, Z., Berak, M., Fülöp, G., Lukács, I., Kanne, T., Nygård, J., Watanaba, K., Taniguchi, T., Makk, P., Csonka, S.: *Gate-controlled supercurrent in an epitaxial Al/InAs nanowires*, Nano Lett. 21, 22, 9684–9690 (2021), IF: 11.62