



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

PhD téziszfüzet

Cooper-pár szétválasztás indium arzenid nanopálcákban

Fülöp Gergő

Témavezető: Dr. Csonka Szabolcs
Egyetemi docens
Fizika Tanszék
BME

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2016

Bevezetés

A kvantummechanika meglepő jelenségekben megmutatkozó sarokköve a kvantumösszefonódás, ami alapfizikai jelentősége mellett alkalmazásokkal is kecsegtet. Az összefonódás különféle kvantumalgoritmusok alapját képezi, amivel bizonyos feladatok, például egész számok prímtényezőkre bontása, vagy diszkrét logaritmus számolása gyorsabban elvégezhető, mint klasszikus számítógépen futó algoritmusokkal [Nielsen and Chuang, 2010]. Egy kvantumbit (qubit), amin a kvantumalgoritmusok a műveleteket végzik, tetszőleges kétállapotú rendszerrel megvalósítható. A nanotechnológia fejlődése az utóbbi évtizedekben lehetővé tette az elektron spinjén alapuló spin qubitek létrehozását félvezető nanoszerkezetekben [Petta et al., 2005]. Egy több qubitből álló kvantumszámítógépben kulcsfontosságú, hogy egymástól távoli qubitek között összefonódást tudjunk létrehozni. A szupravezetők az összefonódás természetes forrásai, mert alapállapotukban az elektronok összefonódott párokat, ún. Cooper-párokat alkotnak. Ahhoz, hogy ezeket qubitek közötti összefonódás létrehozására használjuk, ki kell nyernünk, és térben szét kell választanunk őket.

Az ezt megvalósító eszközöket Cooper-pár szétválasztóknak nevezzük. Cooper-pár szétválasztást elsőként fém nanoszerkezetekben figyeltek meg, normál-szupravezető-normál (N-S-N) [Russo et al., 2005, Kleine, 2010] és ferromágnes-szupravezető-ferromágnes (F-S-F) rétegszerkezetekben [Beckmann et al., 2004]. Egy ilyen áramkört Y-elágazásként képzelhetünk el, ahol a szupravezető a középső elektróda. Egy Cooper-pár szétválasztásához a felhasított pár elektronjai ellentétes oldali normál elektródába kell, hogy távozzanak. Azonban ezekben a kísérletekben a felhasadt párokból származó áram a teljes áramnak csak kis hányadát adta, mert a feltört párok mindkét elektronja dominánsan ugyanabba a normál elektródába távozott. Recher et al. megmutatta, hogy kvantumpöttyöket ágyazva az áramkörbe az elektronok térbeli szétválása kényszeríthető, és a feltörés hatásfoka jelentősen megnövelhető [Recher et al., 2001]. A javasolt N-QD-S-QD-N szerkezetben az elektronok közötti Coulomb taszítás megakadályozza, hogy a felhasadt párok ugyanabba az elektródába távozzanak. Ilyen dupla kvantumpöttyön alapuló Cooper-pár szétválasztók többféle nanoszerkezetben megvalósíthatók. Cooper-pár szétválasztást mutattak már ki indium arzenid (InAs) nanopálcán (NW) [Hofstetter et al., 2009, Das et al., 2012], szén nanocsövön [Herrmann et al., 2010, Schindele et al., 2012] és graféneken [Tan et al., 2015, Borzenets et al., 2015] alapuló áramkörökben is.

Célkitűzések

Az első InAs nanopálcán alapuló Cooper-pár szétválasztóban a szétválasztás hatásfoka alacsony, mindössze néhány százalék volt [Hofstetter et al., 2009]. Ebben az áramkörben a kvantumpöttyök és az elektródák közötti csatolási erősségek nem kézben tartott paraméterek, esetlegesen voltak. Az alacsony hatásfokot a Coulomb-rezonanciáknak a túl erős csatolásokból származó nagy élettartam-kiszélesedése okozta. A PhD kutatómunkám célja hangolható Cooper-pár szétválasztó megvalósítása volt, amiben a csatolási erősségek in-situ hangolhatók, és a szétválasztás folyamata széles paramétertartományban tanulmányozható.

Kísérleti módszerek

PhD kutatómunkámban az InAs nanopálcán alapuló Cooper-pár szétválasztók létrehozására elektronsugaras litográfiát, vékonyréteg-leválasztási eljárásokat (vákuumgőzölés, porlasztás) és marási eljárásokat (reaktív ion marás, fókuszált ionsugaras megmunkálás) használtam fel. Az InAs nanopálcák számos kedvező tulajdonsággal rendelkeznek, többek között könnyen kontaktálhatók mind normál, mind szupravezető elektródákkal. A kutatásom során alumínium (Al), nióbbium (Nb) és ólom (Pb) szupravezető elektródás Cooper-pár szétválasztókat vizsgáltam. A hangolható potenciálgáták létrehozására alsó kapuelektródákat használtam, amiket a nanopálcától vékony (≈ 25 nm) szilícium-nitrid dielektrikumréteg választ el. A transzportkísérleteket He3-He4 rendszerű kriosztátban, $T \approx 30$ mK hőmérsékleten végeztem. A mérőrendszer kriogén szűrésének, az elektronikai összeállításnak és a mérés-automatizálásnak a fejlesztéséhez nagymértékben hozzájárultam. A nanoáramkörök elektromos vezetőképességét kisjelű, alacsony frekvenciás (< 1 kHz) lock-in technikával mértem, tipikusan $10 \mu\text{V}$ nagyságrendű ac gerjesztőfeszültséget alkalmazva.

Tézispontok

1. Nedves kémiai marási eljárásokat, mint kvantumpötty formálási módszereket tanulmányoztam és hasonlítottam össze: piránya, galvanikus és alkáli marás. Híg piránya oldat (kénsav, hidrogén-peroxid és víz) kémiai szelektivitásán alapuló nedves marási eljárást dolgoztam ki. A nanopálcát egy litográfiával definiált szakaszon vékonyítjuk el, és ugyanazt a maszkot használva, önigazítottan kontaktálhatjuk egy fémelektródával az elvékonyított szakaszon. Egy másik módszert is fejlesztettem, amiben a nanopálca a kontaktus mellett vékonyítható el. Megfigyeltem, hogy a marási folyamat ez utóbbi esetben erősen felgyorsul. Ezt egy lokális galvánelem képződésével magyaráztam, amiben a fémelektróda és a nanopálca alkotják az anódot és a katódot. Kvantumpöttyöket hoztam létre ilyen galvanikus marással

megmunkált nanopálcákban, amiket alacsony hőmérsékleti ($T \approx 300$ mK) transzportmérésekkel vizsgáltam. Ezek a mérések megmutatták, hogy az új marási eljárással megmunkált nanopálcák nanoáramkörök működőképes alkotóelemeiként használhatók. [1]

2. Részt vettem hangolható Cooper-pár szétválasztók mintakészítési eljárásának fejlesztésében. Ezek készítéséhez alsó kapuelektrodákat hozunk létre egy szilícium szeleten, majd vékony (~ 25 nm) szigetelőréteget választunk le. Az InAs nanopálcát a kapuelektrodák fölé helyezzük egy mikromanipulátor segítségével, majd szupravezető és normál elektrodákkal kontaktáljuk. Megmutattam, hogy az elektromos potenciál a nanopálca mentén a kapuelektrodákra adott feszültséggel hangolható. Demonstráltam, hogy kvantumpöttyöket lehet formálni potenciálgátak létrehozásával a szupravezető közvetlen közelében, továbbá, hogy a csatolás erőssége a kvantumpötty és az elektrodák között hangolható. A Cooper-pár szétválasztás folyamatát ilyen kapuelektrodákkal hangolható áramkörökben vizsgáltam, és megmutattam, hogy a nemlokális jel erősen függ a csatolási erősségektől. [2, 3]
3. A Cooper-pár szétválasztás hatására az Y-elágazás mindkét ágában azonos mértékben megnövekedett áramot várunk, azaz pozitív nemlokális jelet azonos amplitúdóval. Hangolható Cooper-pár szétválasztók tanulmányozása során különböző amplitúdójú nemlokális jelet találtam a két ágban, továbbá, negatív nemlokális jelet is. Hogy ezeket a megfigyeléseket megmagyarázzam, a nemlokális jelet egy inkohereus mesteregyenletes modellben vizsgáltam a kvantumpöttyök közötti és a kvantumpötty-elektroda csatolások függvényében. Azt találtam, hogy különböző amplitúdójú nemlokális jelet eredményezhet aszimmetrikus csatolás, de negatív nemlokális jelet csak a kvantumpöttyök közötti véges csatolás esetén kaphatunk. Ezen csatolás léte konzisztens a nanoáramkör geometriájával, ugyanis a két kvantumpöttyöt egy nanopálca-szakasz köti össze. [2]
4. A Cooper-pár szétválasztó áramkörben a nemlokális jelnek a mágneses tértől és a kapufeszültségektől való függésének tanulmányozása során erősen aszimmetrikus, Fano-rezonanciára emlékeztető nemlokális jelet találtam. Ez elentétes az elméleti várakozással, ami szerint szimmetrikus, a hangolt kvantumpötty Lorentz-alakú Coulomb rezonanciájával azonos alakú nemlokális jelet várunk. Ezt a kísérleti eredményt egy elméleti fizikusokkal együttműködésben fejlesztett modellben értelmeztem. Ebben a koherens, 3 rácshelyes modellben az aszimmetrikus jelalak megjelenése, és az amplitúdófüggése megmagyarázható. Ezeket az elektronok alternatív transzport útvonalai közötti interferencia eredményezi. [3]
5. A Cooper-párok szétválasztásának folyamatát nemegyensúlyi konfigurációban, a szupravezető és a normál elektrodák közti véges dc feszültség mel-

lett vizsgáltam. Azt találtam, hogy a nemlokális jel a szupravezető kritikus hőmérsékleténél alacsonyabb hőmérsékleten tűnik el. Tanulmányoztam a Cooper-pár szétválasztást Andreev kötött állapotokat mutató kvantumpöttyökön keresztül. Az Andreev kötött állapotok rezonanciájából származó nemlokális jelet Cooper-pár szétválasztó tomográfiás mérésekkel térképeztem fel. Erős nemlokális jelet találtam azokban a konfigurációkban, ahol mindkét kvantumpötty Andreev-rezonanciát mutat. Megmutattam, hogy a nemlokális jel erősen függ az előfeszítéstől és a kvantumpöttyök alapállapotától. A nemlokális jel előjele az előfeszítés előjelének megfordítására, vagy a kvantumpöttyökön végbevitt fázisátmenet hatására megfordul. [4]

Hivatkozások

- [Beckmann et al., 2004] D. Beckmann, H. Weber and H. v. Löhneysen. *Evidence for crossed Andreev reflection in superconductor-ferromagnet hybrid structures*. Physical Review Letters, 93(19):197003, 2004.
- [Borzenets et al., 2015] I. Borzenets, Y. Shimazaki, G. Jones, M. Cracuin, S. Russo, Y. Yamamoto and S. Tarucha. *High efficiency cvd graphene-lead (Pb) Cooper pair splitter*. arXiv preprint arXiv:1506.04597, 2015.
- [Das et al., 2012] A. Das, Y. Ronen, M. Heiblum, D. Mahalu, A. V. Kretinin and H. Shtrikman. *High-efficiency Cooper pair splitting demonstrated by two-particle conductance resonance and positive noise cross-correlation*. Nature Communications, 3:1165, 2012.
- [Herrmann et al., 2010] L. G. Herrmann, F. Portier, P. Roche, A. L. Yeyati, T. Kontos and C. Strunk. *Carbon Nanotubes as Cooper-Pair Beam Splitters*. Phys. Rev. Lett., 104(2):026801, 2010.
- [Hofstetter et al., 2009] L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygård and C. Schönberger. *Cooper pair splitter realized in a two-quantum-dot Y-junction*. Nature, 461:960–963, 2009.
- [Kleine, 2010] A. Kleine. *Experiments on nonlocal processes in NS devices*. Ph.D. thesis, University of Basel, 2010.
- [Nielsen and Chuang, 2010] M. A. Nielsen and I. L. Chuang. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press, 2010.
- [Petta et al., 2005] J. Petta, A. C. Johnson, J. Taylor, E. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. Marcus, M. Hanson and A. Gossard. *Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots*. Science, 309(5744):2180–2184, 2005.

- [Recher et al., 2001] P. Recher, E. V. Sukhorukov and D. Loss. *Andreev tunneling, Coulomb blockade, and resonant transport of nonlocal spin-entangled electrons*. Phys. Rev. B, 63(16):165314–+, 2001.
- [Russo et al., 2005] S. Russo, M. Kroug, T. Klapwijk and A. Morpurgo. *Experimental observation of bias-dependent nonlocal Andreev reflection*. Physical review letters, 95(2):027002, 2005.
- [Schindele et al., 2012] J. Schindele, A. Baumgartner and C. Schönenberger. *Near-unity Cooper pair splitting efficiency*. Phys. Rev. Lett., 109:157002, 2012.
- [Tan et al., 2015] Z. Tan, D. Cox, T. Nieminen, P. Lähteenmäki, D. Golubev, G. Lesovik and P. J. Hakonen. *Cooper pair splitting by means of graphene quantum dots*. Physical Review Letters, 114(9):096602, 2015.

Publikációs lista

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [1] G. Fülöp, S. d'Hollosy, L. Hofstetter, A. Baumgartner, J. Nygård, C. Schönenberger, S. Csonka, *Wet etch methods for InAs nanowire patterning and self-aligned electrical contacts*, Nanotechnology **19**, 195303 (2016).
- [2] G. Fülöp, S. d'Hollosy, A. Baumgartner, P. Makk, V. A. Guzenko, M. H. Madsen, J. Nygård, C. Schönenberger, S. Csonka, *Local electrical tuning of the nonlocal signals in a Cooper pair splitter*, Physical Review B **23**, 235412 (2014).
- [3] G. Fülöp, F. Domínguez, S. d'Hollosy, A. Baumgartner, P. Makk, M. H. Madsen, V. A. Guzenko, J. Nygård, C. Schönenberger, A. L. Yeyati, S. Csonka, *Magnetic field tuning and quantum interference in a Cooper pair splitter*, Physical Review Letters **22**, 227003 (2015).
- [4] L. Hofstetter, S. Csonka, A. Baumgartner, G. Fülöp, S. d'Hollosy, J. Nygård, C. Schönenberger, *Finite-bias Cooper pair splitting*, Physical Review Letters **13**, 136801 (2011).

További publikációk

- [5] Z. Scherübl, G. Fülöp, M. H. Madsen, J. Nygård, S. Csonka, *Electrical tuning of Rashba spin-orbit interaction in multigated InAs nanowires*, Physical Review B **94**, 035444 (2016).
- [6] R. Erdélyi, M. H. Madsen, Gy. Sáfrán, Z. Hajnal, I. E. Lukács, G. Fülöp, S. Csonka, J. Nygård, J. Volk, *In-situ mechanical characterization of wurtzite InAs nanowires*, Solid State Communications **19**, 1829 (2012).
- [7] Á. Orbán, Á. Butykai, A. Molnár, Zs. Pröhle, G. Fülöp, T. Zelles, W. Forsyth, D. Hill, I. Müller, L. Schofield, M. Rebelo, T. Hänscheid, S. Karl, I. Kézsmárki, *Evaluation of a novel magneto-optical method for the detection of malaria parasites*, PLoS One **5**, e96981 (2014).