

csonka.szabolcs_168_24



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

MTA Doktori értekezés tézisei

Mesterséges atomokból felépülő hibrid
kvantumáramkörök

CSONKA Szabolcs

Fizika Tanszék,
Fizika Intézet, TTK
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2024

1 A kutatások előzménye

A nanotechnológia fejlődésének köszönhetően elérhetővé váltak olyan szerkezetek, melyek elektronok számára kis kiterjedésű bezáró potenciálként funkcionálnak, és ezáltal ún. mesterséges atomok (más néven kvantum pöttyök) létrehozását teszik lehetővé.¹ Mesterséges atomokban a kvantált elektronszám, a hangolható csatolás a külvilághoz, és egyszerű áramméréssel elvégezhető spektroszkópia számos alapvető szilárdtestfizikai problémakör mélyebb megértéséhez és minden korábnál pontosabb vizsgálatához vezetett el, mint például a Kondo-effektus² vagy a szupravezetés.³

Napjainkban a kvantummechanika második forradalmát éljük meg, aminek célja, hogy kvantumfizikán alapuló technológiákat fejlesszünk ki, amik lehetővé teszik pl. kvantumszámítógépek létrehozását vagy biztonságos kvantumkommunikációs eszközök gyártását. A mesterséges atomok és molekulák a kvantumszámítógépek létrehozására alkalmas egyik legígéretesebb platform, az ún. spin qubitek alapvető építőkövei.⁴

A kvantumelektronika elmúlt évtizedének legaktívabb területe szupravezetők és félvezetők kombinációjából született. Elméleti munkák szerint ezen áramkörökből új, topologikus szupravezető rendszerek hozhatóak létre,⁵⁻⁸ melyek egzotikus tulajdonságokkal rendelkező kvázirészecskéket tartalmaznak. Ezen ún. Majorana-fermionok és parafermionok különösen érdekesek kvantuminformáció tárolására, mivel topologikus védettségüknek köszönhetően robusztusak, külső zavaroknak ellenálló információátvitelt biztosítanak. Az elmúlt évtizedben óriási kísérleti erőfeszítés indult IT cégek részvételével, hogy félvezető nanopálcában, erős spin-pálya kölcsönhatás mellett, szupravezető közelségében ilyen gerjesztéseket azonosítsanak. Ezen rendszerekben megnyugtató módon nem sikerült igazolni Majorana-fermionok létezését.⁹ A dolgozatban bemutatásra kerülő ún. Andrejev-molekulákkal, ahol két mesterséges atom csatolódik egy szupravezetőn keresztül, áttörő eredményeket születtek az elmúlt évben,¹⁰ megnyitva az utat topologikus szupravezető rendszerek létrehozása felé. Az áramkör működése a dolgozatban bemutatásra kerülő két jelenségkörön alapszik: Cooper-pár szétválasztási folyamaton és a félvezető nanopálcákban jelen lévő spin-pálya kölcsönhatáson.

A mesterséges atomok és molekulák viselkedése még izgalmasabbá válik, ha szupravezetőhöz vagy ferromágneshoz csatoljuk őket. Ferromágneshoz csatolt mesterséges atommal a kicserélődési kölcsönhatás természetét lehet tanulmányozni korábbi módszerekhez képest sokkal nagyobb kontroll mellett. Szupravezetőhöz csatolás esetén a szupravezető makroszkopikus kvantumállapotának és a mesterséges atom kvantált elektronszámának versengéséből számos érdekes jelenségkör származik,¹¹ mint a π -Josephson átmenet, Andrejev kötött állapot vagy az Andrejev-molekula. Szupravezető-kvantumpötty hibrid rendszerekből számos kvantumelektronikai alkalmazás is született, mint a gatemon^{12,13} vagy a kvantummechanikailag összefonott elektronokat létrehozó Cooper-pár szétválasztó áramkör.¹⁴

2 Célkitűzés

A Bázeli Egyetemről hazatérve elsődleges célom az volt, hogy a kvantumáramkörök kísérleti kutatásához szükséges komplex infrastruktúrát létrehozzam itthon. A kísérleti munka kiterjed az áramkörök fejlesztésére és gyártására, melyhez litográfiai berendezést és elektronmikroszkópot hoztam Bázeltől, valamint egy UHV vékonyréteg leválasztó berendezést vásároltunk ERC Starting grant-emből. Az EK MFA-ban elérhető további eszközökkel együtt mára lehetővé vált, hogy tisztatér környezetben rutinszerűen gyártsunk kvantumáramköröket. A kvantumáramkörök vizsgálata kriogénikus környezetet igényel, amit folyékony hélium alapú hűtéssel biztosítunk. A hűtőrendszerek stabil ellátásához egy új hélium cseppfolyósító berendezést sikerült telepítenünk a BME-n, ami biztosítani tudja az alacsony hőmérsékleti kutatások szükséges háttérét a következő két évtizedben. A kvantumáramkörök többségét 100 mK alatti hőmérsékleten vizsgáljuk, amihez He³-He⁴ keverési hűtőrendszerre és alacsony zajszintű, nagy stabilitású elektronikákra volt szükség, amit ugyancsak sikerült beszerezni.

Kutatásaim fő célkitűzése mesterséges atomok és ferromágneses, illetve szupravezető elektródákból felépülő ún. hibrid áramkörök létrehozása és vizsgálata volt.

Kvantumáramköreink alapját változatos nanoszerkezetek (pl. félvezető nanopálcák, grafén lemezek) adják. Megfelelően működő áramkörök elkészítéséhez elengedhetetlen ezen rendszerek anyagtudományi vonatkozásainak a megértése és vizsgálata is. Céljaink elérése érdekében számos új mintafabrikációs protokollt, megmunkálási eljárást is kifejlesztettünk.

A dolgozatban vizsgált kvantumáramkörök nagy része InAs nanopálcán alapszik. InAs-ben erős a spin-pálya kölcsönhatás, ami számos kvantumelektronikai alkalmazás, pl. spin qubitek vagy topologikus szupravezető rendszerek szempontjából fontos tulajdonság. Kutatómunkánk egyik célja volt, hogy megvizsgáljuk, hogy mennyiben hangolható ezen pálcákban a spin-pálya kölcsönhatás külső paraméterekkel, pl. egy kapuelektrodára kapcsolt feszültség segítségével.

Mágneses anyagok kutatása a szilárdtestfizika egyik legfontosabb aktívan művelt területe, ahol atomi szintű modellekre van szükség a mágneses momentumok közötti kölcsönhatás pontos leírásához és a mágneses rend megértéséhez. A ferromágneshez csatolt mesterséges atomok új kísérleti lehetőséget adnak a mágneszettség vizsgálatára. Lehetővé teszik az atomok közötti kicserélődési kölcsönhatás szimulációját, az atomok releváns tulajdonságainak, pl. a csatolási állandónak vagy a nívók helyzetének egyszerű hangolása mellett. Céljaink között szerepelt erre alkalmas nanoáramkörök fejlesztése és vizsgálata is.

Szupravezetők makroszkopikus kvantumállapotát a Cooper-párok kondenzátuma adja. Ezen párok elektronjai spin szinglett állapotot alkotnak, amik kvantummechanikailag maximálisan összefonatok. Célunk volt egy olyan áramkörü koncepció megvalósítása,¹⁴ amely mesterséges atomok felhasználásával képes Cooper-párok kontrollált szétválasztására. Ennek az ún. Cooper-pár szétválasztó áramkörnek nagy a jelentősége spin qubit alapú kvantumszámítógép hardvarek esetén. Összefon elektronokat eljuttatva a gép térben szeparált részeihez, kvantum összefonódás érhető el közöttük is.

A szupravezetőhöz történő csatolás érdekes tulajdonságot ad mesterséges atomokból felépülő molekuláknak is, ahol a molekulát nem egyszerűen vákuumon, hanem egy szupravezetőn keresztüli alagutazással hozzuk létre. A szupravezető nem csak elektronokat tud átengedni az egyik atomról a másikra, hanem a kondenzátumából szabadon kivethetünk egy Cooper-párt és ennek elektronjai megjelenhetnek a két mesterséges atomon. Ilyen, ún. Andrejev-molekula megvalósítása is céljaink között szerepelt.

Kutatásaink kiterjedtek mesterséges atomon alapuló topologikus rendszerek kifejlesztésére és tanulmányozására is, mint pl. spin-pálya kölcsönhatással bíró mesterséges molekulában a mágneses Weyl-pontok keresése.^{T5}

3 Vizsgálati módszerek

A dolgozatban szereplő tudományos eredmények megkövetelték változatos kísérleti technikák meghonosítását és használatát. Kvantumáramkörök gyártásához nanoobjektumok precíz mozgatására és lehelyezésére van szükség, amit saját fejlesztésű mikromanipulátoron alapuló rendszerrel végeztünk. Nanoobjektumok köré elektronsugaras litográfia, különböző fémréteg-leválasztási eljárások (elektronsugaras gőzölés, porlasztás), nedves és száraz marási folyamatok, atomiréteg-leválasztási lépések többszöri ismétlésével készítettünk áramköröket. A technológiai folyamat lépéseinek pontos kioptimalizálása elengedhetetlen a megfelelő áramkörü működéshez. Az áramkörök készítése az EK MFA tisztaterében zajlik, ahol a technológiai lépéssorozathoz szükséges eszközök rendelkezésre állnak. Az áramkörök elsődleges minősítése optikai, atomerő és elektronmikroszkóppal, valamint szobahőmérsékleti elektromos mérésekkel történik. Ezek után saját fejlesztésű transzport mintatartókban zajlanak a mérések He⁴ kriosztátban vagy He³-He⁴ keverési hűtőrendszerben; utóbbival 10 mK körüli hőmérséklet érhető el. A mérésekhez szupravezető mágnesek biztosítják a mágneses teret. Egy-egy áramkör hangolása és mérése több hónapot is igénybe vehet, így alapvető követelmény a mérőrendszerek nagy stabilitása. A transzport méréseket alacsony frekvenciás lock-in technikával végeztük, kis jelszinten (10 μV), saját fejlesztésű, számítógép-vezérelt mérőrendszerrel. Munkánk a mérések elemzése mellett modellek kifejlesztésére is kiterjedt, melyek segítenek a kísérleti eredmények magyarázatában, új áramkörü geometriák tervezésében.

4 Új tudományos eredmények tézisszerű megfogalmazásai

A tézispontok számozása a doktori értekezés kapcsolódó fejezetszámát követi.

1.1. InAs nanopálcákban mesterséges atomok formálására önigazított nedves marási eljárást dolgoztam ki, amely a pálcák elvékonyítását teszi lehetővé a kontaktusok közvetlen közelében, ugyanazt a litográfiai maszkot használva a kontaktusok párolgotatása és a marási folyamat során. [T1]

- 1.2. **Grafén kvantumpöttyöket hoztam létre Landau-nívók közötti tiltottsávot használva.** Megmutattam, hogy grafén nanoszalagot külső mágneses térbe helyezve jelentős tiltott sáv nyitható a Dirac-ponthoz közeli Landau-szint körül, ami elektrosztatikus potenciállal kombinálva kvantumpöttyöt tud létrehozni a szalag belsejében. A kvantumpötty és az elektródák közötti kapcsolatot az élállapotokba történő alagutazás biztosítja. [T2]
- 2.1. **Kimutattam a spin-pálya kölcsönhatás hangolását InAs nanopálcában,** pálcára merőleges elektromos teret létrehozva két közeli kapuelektroda segítségével. Gyenge lokalizációs mérésekben a spinrelaxációs hossz közel felére volt csökkenthető merőleges elektromos térrel, miközben a pálcá vezetőképessége állandó értéken volt tartva. [T3]
- 2.2. **InAs kvantumpöttyökben a g-faktor erős hangolását** mutattam ki. InAs nanopálcában két kapuelektroda segítségével változtatva a kvantumpötty bezáró potenciáljának alakját, a Kondo-csúcs mágneses felhasadásából meghatároztam az elektronállapotok g-faktorát, ami egy nagyságrendet változott. [T4]
- 2.3. **Mágneses Weyl-pontokat figyeltem meg csatolt kétspin rendszerben.** Ezen rendszerekben topológiai megfontolásokat alkalmazva igazolható, hogy az alapállapotú degenerációkat a spin-pálya kölcsönhatás nem szüntetheti meg, kell maradni a mágneses térben olyan pontnak, ahol az alapállapot degenerált marad. InAs nanopálcában kialakított, erős spin-pálya kölcsönhatással bíró, mesterséges molekulában megvalósítottam egy ilyen kétspin rendszert, és spektroszkópiai vizsgálatokkal igazoltam ezen degenerációk, az ún. mágneses Weyl-pontok jelenlétét. [T5]
- 3.1. **Ferromágnes és mesterséges atom közötti kicserélődés hangolását** mutattam ki. InAs pálcában kialakított mesterséges atomot csatoltam ferromágneshez. Megmutattam, hogy az atomon létrejövő kicserélődési tér jelentősen függ a mesterséges atomon lévő elektronszámtól. Az egymás után betöltésre kerülő elektronpályák akár antiferromágnesesen, akár ferromágnesesen is csatolódhatnak a mágneshez. A csatolás jellege egyetlen elektronállapot esetén is megváltoztatható a mesterséges atom energiaszintjének hangolásával, az energiaszint kiűrités-közeli állapotától a kétszeres betöltéshez közeli állapothoz elmozdulva. [T6]
- 3.2. **Mesterséges atomon alapuló spinpolarizált áramforrás** elvét dolgoztam ki. A spintronikában ferromágneses elektródákat alkalmaznak spinpolarizált elektronok injektálására. Olyan spinforrást javasoltam, melyben a ferromágnes határfelületére mesterséges atomot csatolunk. Ekkor a forrásból kilépő elektronok polarizációja jelentősen nagyobb lehet a ferromágnes belső polarizációjánál, valamint a polarizáció iránya a mesterséges atom hangolásával meg is fordítható. [T7]
- 4.1. **Cooper-pár szétválasztó áramkört valósítottam meg,** amely kvantumpötty-szupravezető-kvantumpötty geometrián alapszik. Nemlokális árammérésen alapuló módszert dolgoztam ki a Cooper-pár szétválasztási folyamat detektálására. Az InAs nanopálcából kialakított áramkörön megbecsültem a szétválasztási folyamatának határfokát, melyre néhány százalék adódott. [T8]
- 4.2. **Véges dc feszültségen vizsgáltam a Cooper-pár szétválasztó áramkör viselkedését.** Megmutattam, hogy a nemlokális áramjárulék változatos jelalakokat vehet fel, attól függően, hogy a kvantumpöttyök rezonanciáit hová hangoljuk a Fermi-szinthez képest. A Cooper-pár szétválasztási folyamaton kívül többszörös alagutazási folyamat is szerepet játszik véges feszültségen. A két folyamat összjátékából sikerült kvalitatívan megmagyarázni a nemlokális jel viselkedését. [T9]
- 4.3. **Cooper-pár szétválasztókat fejlesztettem ki finom kapuelektroda struktúrára, ami lehetővé tette a kvantumpöttyök csatolási állandóinak finom hangolását.** Megmutattam, hogy a szétválasztó egyik ágának vezetőképességét hangolva, a nemlokális szétválasztásból származó vezetőképesség korrekció pozitívba negatívba válthat, összhangban a rátaegyenletek alapján végzett szimulációkkal. [T10]
- 4.4. **Vizsgáltam a Cooper-pár szétválasztó viselkedését véges mágneses térben ólom szupravezetőt használva.** A nemlokális jel megértése céljából egy új modelljét fejlesztettem a Cooper-pár szétválasztónak,

ami egy harmadik kvantumpöttyöt tartalmaz a szupravezető alatt, és a két szélső kvantumpötty ezen keresztül csatlakozik a szupravezetőhöz. A modellben jelentkező koherens interferenciafolyamatok segítségével sikerült a mérésben tapasztalt Fano-jellegű nemlokális jelalakot visszakapni. [T11]

- 4.5. A spin qubitek eszköztárán alapuló módszert dolgoztam ki a Cooper-pár szétválasztó által elválasztott elektronok összefonódottságának mérésére.** A szétválasztó kvantumpöttyein egy-egy elektront előzetesen adott spinkonfigurációba inicializálunk, majd megpróbálunk egy Cooper-párt kitenni rájuk. A kitétel csak a Pauli-elv teljesítése esetén lehetséges, melynek sikerességét töltésdetektor segítségével tudjuk mérni. A módszerrel az elektrónpár szinglett karaktere meghatározható. [T12]
- 5.1. Szupravezető-mesterséges atom rendszerben az Andrejev kötött állapot kiterjedését vizsgáltam.** A kötött állapotot korábbi STM mérésekhez képest egy nagyságrenddel nagyobb távolságban, a mesterséges atomtól ~ 100 nm-re is detektálni lehetett. A kötött állapot nemlokális jele jelentősen növekedett mágneses térben, amit sikerült kvalitatíven megmagyarázni. A nagy kiterjedés lehetővé teszi, hogy standard litográfiai technikával elérhető, 50 – 100 nm távolságba elhelyezett mesterséges atomok között az Andrejev-állapotok között jelentős átfedés jöjjön létre. [T13]
- 5.2. Elméleti úton vizsgáltam az Andrejev-molekula,** azaz a kvantumpötty-szupravezető-kvantumpötty rendszer **spektrumát.** Az Andrejev-molekula viselkedésében a kereszt-Andrejev reflexió (CAR), a rugalmas többszörös alagutazás (EC) és a pöttyök közötti direkt alagutazás (IT) a releváns csatolási folyamatok. Feltérképeztem a molekula fázisdiagramját valamint mérhető mennyiségeinek viselkedését, amikor egy-egy csatolási folyamat releváns. Egy egyszerű töltésdetektor jelének vizsgálatával az IT megkülönböztethetővé válik a többi folyamattól, míg a CAR és EC folyamatok véges feszültségen mért alagút-spektruskópiában választhatóak szét. [T14]
- 5.3 Topologikus félvezető - szupravezető hibrid rendszerek megvalósításának céljából új dupla pálcás nanoszerkezet** növesztését javasoltam. A nanoszerkezet két InAs nanopálcát tartalmaz, melyek növekedés közben összetapadnak, végül egy epitaxiálisan növesztett közös alumínium héjat kapnak. A dupla pálcák transzport minősítését követően **elsőként hoztam létre Andrejev-molekulát** ilyen szerkezetben. A molekula spektrumát részletesen feltártam a kvantumpöttyök energiaszintjeinek függvényében, ami kvalitatív egyezést mutatott szimulációs eredményekkel. [T15, T16]

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

- [T1] G. Fülöp, S. d’Hollosy, L. Hofstetter, A. Baumgartner, J. Nygård, C. Schönenberger, and S. Csonka, “Wet etch methods for inas nanowire patterning and self-aligned electrical contacts,” *Nanotechnology*, vol. 27, p. 195303, 5 2016.
- [T2] E. Tóvári, P. Makk, P. Rickhaus, C. Schönenberger, and S. Csonka, “Signatures of single quantum dots in graphene nanoribbons within the quantum hall regime,” *Nanoscale*, vol. 8, pp. 11480–11486, 2016.
- [T3] Z. Scherübl, G. Fülöp, M. H. Madsen, J. Nygård, and S. Csonka, “Electrical tuning of rashba spin-orbit interaction in multigated inas nanowires,” *Physical Review B*, vol. 94, p. 035444, 7 2016.
- [T4] S. Csonka, L. Hofstetter, F. Freitag, S. Oberholzer, C. Schönenberger, T. S. Jespersen, M. Aagesen, and J. Nygård, “Giant fluctuations and gate control of the g-factor in InAs nanowire quantum dots,” *Nano Letters*, vol. 8, pp. 3932–3935, 11 2008.
- [T5] Z. Scherübl, A. Pályi, G. Frank, I. E. Lukács, G. Fülöp, B. Fülöp, J. Nygård, K. Watanabe, T. Taniguchi, G. Zaránd, and S. Csonka, “Observation of spin-orbit coupling induced weyl points in a two-electron double quantum dot,” *Communications Physics*, vol. 2, p. 108, 9 2019.
- [T6] L. Hofstetter, A. Geresdi, M. Aagesen, J. Nygård, C. Schönenberger, and S. Csonka, “Ferromagnetic proximity effect in a ferromagnet-quantum-dot-superconductor device,” *Physical Review Letters*, vol. 104, p. 246804, 6 2010.

- [T7] S. Csonka, I. Weymann, and G. Zarand, “An electrically controlled quantum dot based spin current injector,” Nanoscale, vol. 4, p. 3635, 2012.
- [T8] L. Hofstetter, S. Csonka, J. Nygård, and C. Schönenberger, “Cooper pair splitter realized in a two-quantum-dot y-junction,” Nature, vol. 461, pp. 960–963, 10 2009.
- [T9] L. Hofstetter, S. Csonka, A. Baumgartner, G. Fülöp, S. d’Hollosy, J. Nygård, and C. Schönenberger, “Finite-bias cooper pair splitting,” Physical Review Letters, vol. 107, p. 136801, 9 2011.
- [T10] G. Fülöp, S. d’Hollosy, A. Baumgartner, P. Makk, V. A. Guzenko, M. H. Madsen, J. Nygård, C. Schönenberger, and S. Csonka, “Local electrical tuning of the nonlocal signals in a cooper pair splitter,” Physical Review B, vol. 90, p. 235412, 12 2014.
- [T11] G. Fülöp, F. Domínguez, S. d’Hollosy, A. Baumgartner, P. Makk, M. Madsen, V. Guzenko, J. Nygård, C. Schönenberger, A. L. Yeyati, and S. Csonka, “Magnetic field tuning and quantum interference in a cooper pair splitter,” Physical Review Letters, vol. 115, p. 227003, 11 2015.
- [T12] Z. Scherübl, A. P alyi, and S. Csonka, “Probing individual split cooper pairs using the spin qubit toolkit,” Physical Review B, vol. 89, p. 205439, 5 2014.
- [T13] Z. Scherübl, G. Fülöp, C. P. Moca, J. Gramich, A. Baumgartner, P. Makk, T. Elalaily, C. Schönenberger, J. Nygård, G. Zar and, and S. Csonka, “Large spatial extension of the zero-energy γ -shiba–rusinov state in a magnetic field,” Nature Communications, vol. 11, p. 1834, 4 2020.
- [T14] Z. Scherübl, A. P alyi, and S. Csonka, “Transport signatures of an andreev molecule in a quantum dot–superconductor–quantum dot setup,” Beilstein Journal of Nanotechnology, vol. 10, pp. 363–378, 2 2019.
- [T15] T. Kanne, D. Olsteins, M. Marnauza, A. Vekris, J. C. E. Saldaña, S. Loric, R. D. Schlosser, D. Ross, S. Csonka, K. Grove-Rasmussen, and J. Nygård, “Double nanowires for hybrid quantum devices,” Advanced Functional Materials, vol. 32, p. 2107926, 2 2022.
- [T16] O. K urt ossy, Z. Scherübl, G. Fülöp, I. E. Lukács, T. Kanne, J. Nygård, P. Makk, and S. Csonka, “Andreev molecule in parallel inas nanowires,” Nano Letters, vol. 21, pp. 7929–7937, 10 2021.

Tov bbi hivatkoz ások

- [1] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha, and L. M. K. Vandersypen, “Spins in few-electron quantum dots,” Reviews of Modern Physics, vol. 79, pp. 1217–1265, 10 2007.
- [2] D. Goldhaber-Gordon, H. Shtrikman, D. Mahalu, D. Abusch-Magder, U. Meirav, and M. A. Kastner, “Kondo effect in a single-electron transistor,” Nature, vol. 391, pp. 156–159, 1 1998.
- [3] J. von Delft and D. Ralph, “Spectroscopy of discrete energy levels in ultrasmall metallic grains,” Physics Reports, vol. 345, pp. 61–173, 4 2001.
- [4] D. Loss and D. P. DiVincenzo, “Quantum computation with quantum dots,” Physical Review A, vol. 57, pp. 120–126, 1 1998.
- [5] J. D. Sau, R. M. Lutchyn, S. Tewari, and S. D. Sarma, “Generic new platform for topological quantum computation using semiconductor heterostructures,” Physical Review Letters, vol. 104, p. 040502, 1 2010.
- [6] J. Alicea, “Majorana fermions in a tunable semiconductor device,” Physical Review B, vol. 81, p. 125318, 3 2010.
- [7] R. M. Lutchyn, J. D. Sau, and S. D. Sarma, “Majorana fermions and a topological phase transition in semiconductor-superconductor heterostructures,” Physical Review Letters, vol. 105, p. 077001, 8 2010.

- [8] Y. Oreg, G. Refael, and F. von Oppen, “Helical liquids and majorana bound states in quantum wires,” Physical Review Letters, vol. 105, p. 177002, 10 2010.
- [9] S. D. Sarma, “In search of majorana,” Nature Physics, 2 2023.
- [10] T. Dvir, G. Wang, N. van Loo, C.-X. Liu, G. P. Mazur, A. Bordin, S. L. D. ten Haaf, J.-Y. Wang, D. van Driel, F. Zatelli, X. Li, F. K. Malinowski, S. Gazibegovic, G. Badawy, E. P. A. M. Bakkers, M. Wimmer, and L. P. Kouwenhoven, “Realization of a minimal kitaev chain in coupled quantum dots,” Nature, vol. 614, pp. 445–450, 2 2023.
- [11] S. D. Franceschi, L. Kouwenhoven, C. Schönenberger, and W. Wernsdorfer, “Hybrid superconductor–quantum dot devices,” Nature Nanotechnology, vol. 5, pp. 703–711, 10 2010.
- [12] T. Larsen, K. Petersson, F. Kuemmeth, T. Jespersen, P. Krogstrup, J. Nygård, and C. Marcus, “Semiconductor-nanowire-based superconducting qubit,” Physical Review Letters, vol. 115, p. 127001, 9 2015.
- [13] G. de Lange, B. van Heck, A. Bruno, D. van Woerkom, A. Geresdi, S. Plissard, E. Bakkers, A. Akhmerov, and L. DiCarlo, “Realization of microwave quantum circuits using hybrid superconducting-semiconducting nanowire josephson elements,” Physical Review Letters, vol. 115, p. 127002, 9 2015.
- [14] P. Recher, E. V. Sukhorukov, and D. Loss, “Andreev tunneling, coulomb blockade, and resonant transport of nonlocal spin-entangled electrons,” Physical Review B, vol. 63, p. 165314, 4 2001.