

PhD tézis füzet

Investigation of nanostructures using
high-frequency techniques

Nanoáramkörök vizsgálata nagyfrekvenciás
módszerekkel

Kocsis Mátyás

Témavezető: Fülöp Gergő
Tudományos munkatárs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Fizika tanszék
2025



Bevezető

A félvezető eszközök miniaturizálása évtizedek óta a Moore-törvény által jósolt exponenciális növekedés hajtóereje. Azonban, ahogy a tranzisztorok méretei megközelítik az atomi skálát, a skálázás fizikai és gazdasági korlátai nyilvánvalóvá váltak [1]. Jelentős kihívást jelent a növekvő felvett teljesítmény és hőtermelés, ami nem csak a maximális órajelet korlátozza, hanem komoly hőkezelési problémákat is felvet.

Ezzel párhuzamosan a szupravezető alapú klasszikus számítástechnika területe szintén fejlődik. Olyan rendszereket fejlesztettek ki, amelyek alapvető építőelemeiként szupravezető kapcsolókat használnak [2]. Ezek az áramkörök rendkívül nagy sebességgel, akár 50 GHz feletti órajellel is képesek működni, miközben nagyságrendekkel kevesebb hőt disszipálnak, mint félvezető társaik [3]. Egy nemrégiben leírt jelenség, a kapuvezérelt szupravezetés [4], akár a meglévőknél is jobb teljesítményű szupravezető logikai áramkörökhöz vezethet [5].

A kvantumszámítástechnika is rohamosan fejlődik, az elméleti koncepcióktól a gyakorlati, bár még gyerekcipőben járó eszközök felé haladva. A „kvantumelőny” demonstrálása, ahol egy kvantumszámítógép olyan feladatot hajt végre, amely egy klasszikus számítógép számára megvalósíthatatlan, jelentős mérföldkövet jelentett [6]. Kiterjedt elméleti és kísérleti munka fókuszált az Andreev qubitekre, amelyek egy Josephson-átmeneten belül csapdába ejtett részecskékből állnak [7–9]. Emellett megjelentek az Andreev spin qubitek is, ahol a qubit információja a csapdába ejtett részecske spinjében van kódolva, nem pedig az Andreev kötött állapot betöltöttségében [10–12]. A csatolt Andreev kötött állapotok közötti kölcsönhatást és az Andreev molekulák kialakulását szintén széles körben tanulmányozták [13–24].

Érdekes módon mind a nagy teljesítményű klasszikus szupravezető számítástechnika, mind a legígéretesebb kvantumszámítógép-platformok, mint például a szupravezető qubiteken alapuló, hasonló alapvető technológiákra támaszkodnak: szupravezető nanostruktúrákra és nagyfrekvenciás elektronikára. Ezek a közös vonások olyan javaslatokhoz vezetett, amelyek új, hibrid rendszerek létrehozására irányulnak, amelyek egyesítik a kettő erősségeit [25, 26]. A gyors, alacsony fogyasztású single flux quantum digitális logika és az érzékeny szupravezető qubitek integrálásával igyekeznek leküzdeni a jelenlegi kvantumszámítógépek skálázhatósági szűk keresztmetszeteit, mint a nagy hőterhelés és a szobahőmérsékletű vezérlőelektronika nagy fizikai mérete [26]. Ez a hibrid megközelítés, a kvantum- és klasszikus processzorokat szorosan integrált koprocesszorokként kezeli.

Célok

Alacsony hőmérsékletű rádiófrekvenciás mérőrendszer fejlesztése

Az alacsony hőmérsékletű rádiófrekvenciás (RF) mérési technikák értékes eszközök számos rendszer tanulmányozásában, és pótolhatatlanok, ha kvantumbitekről van szó. A PhD tanulmányaim kezdetén, a kutatócsoportunk nem rendelkezett a szükséges felszereltséggel az ilyen mérések elvégzéséhez. Első céлом az volt, hogy létrehozzam a szükséges infrastruktúrát ezen kísérletek elvégzéséhez.

Ez magában foglalta egy He^3/He^4 dilúciós hűtőrendszer beüzemelését, amely képes 100 mK alatti hőmérsékleteket elérni. Ezt a feladatot tipikusan a gyártó képzett technikusai végzik. A pandémia okozta utazási korlátozások miatt azonban a rendszert külső segítség nélkül kellett telepíteni.

Ezen felül telepítettem több RF eszközt és azokat a teljes rendszerbe integráltam. Továbbá számos egyedi, a rendszer működéséhez elengedhetetlen alkatrészt terveztem és építettem, például egy RF-DC mintatartót és rézpor alapú szűrőket.

Ezen kívül terveztem, gyártottam és karakterizáltam magas minőségű NbTiN szupravezető koplánáris hullámvezető rezonátorokat, amelyek nanoáramkörök RF vizsgálatára használhatók.

Egy kvantumpont alapú Josephson-átmenetben található Andreev kötött állapot teljes karakterizálása

A Josephson-átmenetek (JJ-k), amelyek két szupravezető (SC) vezetékből és egy őket összekötő elemből állnak [27], alapvető fontosságúak számos qubit [28] és szupravezető logika architektúra számára [29].

A JJ-kben Andreev kötött állapotok (ABS-ek) alakulnak ki: ezek olyan részecskék, amelyek az átmeneten belül rekednek és szuperáramot szállítanak [30]. Bár sok JJ típust tanulmányoztak már, a kvantumpont (QD) alapú JJ-k különösen figyelemre méltóak, mivel lehetővé teszik a JJ vezérlését elektrosztatikus kapuzással [31].

Kutatócsoportunk A. Geresdi csoportjától kapott egy mintát, mely egy nagy kinetikus induktivitású rezonátorhoz galvanikusan csatolt Al/InAs nanopálcából áll, utóbbin egy rövid szakaszon elmaradt Al egy QD alapú JJ-t képez. Ez a minta nagyon hasonló a [32] referenciában leírtakhoz. Ezt a mintát a kvantumpont tartományban vizsgáltuk a szupravezető-atomi-határ modell (SCAL) használatával. A korábbi tanulmány a nyitott tartományra fókuszált, ahol a JJ-t egyetlen átviteli valószínűséggel, a τ paraméterrel rendelkező ballisztikus csatornaként írták le.

Elemeztem a rendszeren végzett RF méréseket. Vizsgáltam a rendszer viselkedését a kapufeszültség és az alkalmazott mágneses fluxus változtatásával. Két különböző RF jel használatával sikerült feltérképeznem az ABS energiaspektrumát. Ezen eredmények felhasználásával kinyertem a rendszer összes releváns paraméterét: az ABS-rezonátor csatolási erősségét, a QD és az egyes SC vezetékek közötti csatolási erősséget, valamint a QD töltési energiáját.

Andreev molekuláris állapotok modellezése két kvantumpont alapú Josephson-átmenetben.

Amikor két ABS-t tartalmazó Josephson-átmenet (JJ) elég közel van egymáshoz, a két kötött állapot hibridizálódik, hasonlóan ahhoz, ahogyan két hidrogénatom hidrogénmolekulát alkot. A két Andreev kötött állapotból így létrehozott állapotot hívjuk Andreev molekuláris állapotnak (AMS) [13]. Mielőtt elkezdtem volna egy kvantumpont alapú, AMS-t tartalmazó rendszer kísérleti megvalósítását, szerettem volna megérteni az állapot kulcsfontosságú jellegzetességeit. Bár léteztek modellek az egycsatornás [13] és a többscsatornás szórási centrumokkal modellezett JJ-kre [14], a kvantumpont alapú, AMS-t tartalmazó rendszerek modellezése hiányzott.

Ezt a kvantumpont alapú AMS rendszert zero bandwidth (ZBW) módszerekkel modelleztem, mivel azok különösen jól alkalmazhatók ilyen rendszerek modellezésére [33]. A ZBW modell használatával diagonalizálni tudtam a rendszer Hamilton-függvényét, és kinyertem, valamint kiszámítottam a kísérletileg releváns értékeket. A számításokat azzal az esettel validáltam, amelyben az AMS minimális szerepet játszik, és a rendszer egyetlen ABS-hez hasonlít.

Az áram-fázis relációra (CPR) fókuszáltam, és vizsgáltam azt mindkét kvantumpont on-site energiájának, valamint a nemlokális JJ fluxusának függvényében. Ezekből a mérésekből azonosítottam az AMS kulcsfontosságú jellegzetességeit. Azt is tanulmányoztam, hogyan befolyásolják az eredményeket a kvantumpontok és a szupravezető vezetékek közötti csatolásokban lévő variációk.

Kapuzott szupravezető Al héjú InAs nanopálca kapcsolási időskálái

A kapuvezérelt szupravezetés (GCS) jelenségének magyarázatára különféle mikroszkopikus mechanizmusokat javasoltak az elmúlt években, és a különböző tanulmányozott rendszerek eltérő mechanizmusok jeleit mutatják [4]. GCS-t figyeltek meg olyan rendszerekben, amelyek kapuzott szupravezetőként egy InAs nanopálca (NW) epitaxiális Al-héját használják. Mivel a kapcsolási időskála mérése segíthet megkülönböztetni ezeket a mechanizmusokat, és ehhez gyors mérésekre van szükség, a rádiófrekvenciás (RF) technikák ideális választásnak bizonyultak.

Egy olyan eszközt tanulmányoztam, amelyet RF és DC technikákkal is lehetett mérni, egy rezonátor nélküli Al/InAs nanopálca alapú rendszeren. Vizsgáltam a rendszer választását az áram terhelésre és az állandó DC kapufeszültségekre is, miközben folyamatosan figyeltem a szivárgási

áramot. Annak érdekében, hogy érzékeljem a normál és szupravezető állapotok közötti kapcsolásokat, a NW RF átvitelét figyeltem. Ezeket az RF méréseket a DC eredményekkel összehasonlítottam.

Különböző impulzus-sorozatokot alkalmaztam a kapu elektródára, állandó DC feszültségekkel együtt. A NW-n áthaladó RF átvitel változásainak tanulmányozásával a kapcsolások időskálái meghatározhatók. Ezeknek a kapcsolási időskáláknak az elemzése betekintést nyújt azokba a specifikus mikroszkopikus folyamatokba, amelyek a GCS-t kiváltják ebben a mintában.

Tézispontok

1. NbTiN elosztott-paraméterű rezonátorokat terveztem, gyártottam és karakterizáltam, melyek belső jósági tényezője elérte a $Q_i = 11700$ értéket, csatolási jósági tényezője pedig $Q_c = 18900$. Ezen felül létrehoztam egy alacsony hőmérsékletű, rádiófrekvenciás mérésekre alkalmas kísérleti rendszert, beleértve egy dilúciós hűtő telepítését és a kapcsolódó eszközök integrálását. Ezzel a rendszerrel munkatársaim egy InAs nanopálca alapú kvantumpontra Josephson-átmenetet mértek, mely egy nagyimpedanciás rezonátorhoz volt csatolva. A teljes mintát A. Geresdi csoportjában készítették. Ezeknek a méréseknek az adatait elemeztem, elemzésem a szupravezető-atomi-határ (SCAL) modellre alapult. Egytónusú mérésekkel több szinglett-dublett átmenetet mutattam be, és kéttónusú spektroszkópiával feltérképeztem egy Andreev kötött állapot (ABS) energiaspektrumát. Több-fotonos folyamatokat is azonosítottam, melyek valószínűsége az RF jel teljesítményével nő. A mérésekből kinyertem az ABS és a rezonátor közötti közel ultraerős csatolási erősséget ($g/2\pi = 500$ MHz), valamint az aszimmetrikus csatolásokat a QD és a szupravezető vezetékek között ($\Gamma_L = 26.8 \mu\text{eV}$, $\Gamma_R = 22.7 \mu\text{eV}$). Megbecsültem a QD töltési energiáját ($U = 45 \mu\text{eV}$), és feltérképeztem az SCAL modell összes releváns paraméterét. [P3]
2. Szimulációkat készítettem két kvantumpontra alapú Josephson-átmenetről, melyek egy közös középső szupravezető kontaktussal rendelkeznek, a zero bandwidth modell felhasználásával. Feltérképeztem a rendszer paraméterterét, azonosítva azokat a területeket melyek alaposabb vizsgálatot igényelnek, és megmutattam, hogy a rendszer Andreev molekuláris állapotoknak ad otthont. Azonosítottam az Andreev molekuláris állapotok kulcsfontosságú kísérleti jellegzetességeit az áram-fázis reláció (CPR) görbéinek feltérképezésével, mind a lokális, mind a nemlokális on-site energia és fázis függvényében. A modellt azáltal validáltam, hogy reprodukáltam már ismert lokális fluxus és on-site energia hangolást egyszerűbb esetekben. Emellett bemutattam a nemlokális Josephson-effektust is, megmutatva, hogyan képes a nemlokális fluxus hangolása φ_0 eltolódásokat és $0 - \pi$ átmeneteket indukálni. Megmutattam, hogy a rendszer képes $0 - \pi$ átmeneteket produkálni alapállapot váltással vagy anélkül. Tanulmányoztam a nemlokális JJ áramát és feltérképeztem ennek az átmenetnek a CPR-ét is. Ezenkívül feltártam a lehetséges alkalmazásokat is. Azt találtam, hogy a rendszer hangolható szupravezető dióda effektust mutat, amelynek hatásfoka akár $\nu = 0.13$. Elemeztem a $\cos 2\varphi$ -szerű CPR-ek 2φ tartalmát, arra a következtetésre jutva, hogy a rendszer nem alkalmas védett 2φ qubitek létrehozására. Végül megerősítettem, hogy a fenti megállapítások robusztusak a csatolási erősségek változásaival szemben, ami kritikus a kísérleti megvalósítás szempontjából. [P1]
3. Egy alacsony hőmérsékletű kísérleti rendszert fejlesztettem ki, amely lehetővé tette minták közvetlen RF mérését – heterodin és homodin módszerekkel – rezonátorok használata nélkül. Munkatársaim mind DC és RF adatokat gyűjtöttek egy kapuzható Al/InAs nanohpálcáról. Az adatokat a szupravezető kapuzási effektus tanulmányozásának céljából elemeztem. A DC és RF eredmények összehasonlításával megmutattam, hogy a mikrohullámú átvitel felhasználható a szupravezető nanopálca állapotának meghatározására, sokkal rövidebb időskálán, mint a hagyományos DC módszerekkel. Mértém a rendszer kritikus áramát, és az állandó DC feszültséget, amelyet a kapura kapcsolva a szivárgási áram miatt a szupravezetés teljesen megszűnik. Ezt az effektust kapuvezérelt szupravezetésnek (GCS) nevezik. Bemutat-

tam, hogy a nanopálca a kapura adott feszültségimpulzusok révén is átkapcsolható a normál állapotba, még akkor is, ha az impulzus amplitúdója nem éri el a korábban bemutatott kapcsoláshoz szükséges feszültségküszöböt. Kimutattam, hogy az impulzusok által kiváltott kapcsolás az eltolási áramnak köszönhető, nem pedig a szivárgási áramnak. Tanulmányoztam az eltolási áram által kiváltott kapcsolás (DCIS) eredetét, és visszavezettem azt a chipen lévő elektródák közötti kapacitásokra. A rendszer trapéz alakú impulzusokra adott válaszának tanulmányozásával, meghatároztam a kritikus feszültség emelkedési rátákat. Kiszámoltam a kapacitást ezekből a rátákból, és összehasonlítottam azokat a végeselemes szimulációkból kapott értékekkel, jó egyezést találva. [P2]

4. Elemeztem egy elektrosztatikusan kapuzott Al/InAs nanopálcán munkatársaim által gyűjtött rádiófrekvenciás (RF) mérések eredményeit. Többféle megközelítést alkalmaztam az eltolási áram által kiváltott kapcsolás (DCIS) és a szivárgási áram alapú kapuvezérelt szuperáram (GCS) jelenségek időskáláinak meghatározására. Részletes elemzést végeztem a kritikus emelkedési ráta alatti impulzusválaszokról, ahol az eltolási áram túl alacsony ahhoz, hogy elnyomja a szupravezetést. Ezekből az eredményekből kiszámítottam a szivárgáson alapuló kapcsolás időskáláit, mind a szupravezetőből normál állapotba ($t_{\text{GCS}} = 5$ ns), mind a normálból szupravezető állapotba ($t_{\text{relax}} = 15$ ns) való átmenethez. Megmutattam, hogy a normálból szupravezető állapotba való relaxáció lassabb, a minta lassú termalizációja miatt. Bemutattam, hogy a közvetlen RF átviteli mérések felső határt szabnak az érzékelhető kapcsolási időskálának: $t_{\text{DCIS}} < 2$ ns. Megmutattam, hogy ez igaz mind az eltolási áram által kiváltott ideiglenes átmenetekre, mind a teljes átmenetekre, ahol a kapufeszültség a küszöb felett marad, és tartósan elnyomja a szupravezetést. [P2]

Publikációk

Tézisponthoz rendelt

P1 Kocsis, M.; Scherübl, Z.; Fülöp, G.; Makk, P.; Csonka, S. Strong Nonlocal Tuning of the Current-Phase Relation of a Quantum Dot Based Andreev Molecule. *Phys. Rev. B* 2024, 109 (24), 245133.

P2 Scherübl, Z.; **Kocsis, M.**; Elalaily, T.; Kupás, L.; Berke, M.; Fülöp, G.; Kanne, T.; Berggren, K. K.; Nygård, J.; Csonka, S.; Makk, P. Multimode Operation of a Superconducting Nanowire Switch in the Nanosecond Regime. *ACS Nano* 2025, 19 (32), 29207–29215.

P3 Előkészítés alatt

Tézisponthoz nem rendelt

P4 Kovács-Krausz, Z.; Hoque, A. M.; Makk, P.; Szentpéteri, B.; **Kocsis, M.**; Fülöp, B.; Yakushev, M. V.; Kuznetsova, T. V.; Tereshchenko, O. E.; Kokh, K. A.; Lukács, I. E.; Taniguchi, T.; Watanabe, K.; Dash, S. P.; Csonka, S. Electrically Controlled Spin Injection from Giant Rashba Spin–Orbit Conductor BiTeBr. *Nano Lett.* 2020, 20 (7), 4782–4791.

P5 Kocsis, M.; Zheliuk, O.; Makk, P.; Tóvári, E.; Kun, P.; Tereshchenko, O. E.; Kokh, K. A.; Taniguchi, T.; Watanabe, K.; Ye, J.; Csonka, S. In Situ Tuning of Symmetry-Breaking-Induced Nonreciprocity in the Giant-Rashba Semiconductor BiTeBr. *Phys. Rev. Research* 2021, 3 (3), 033253.

Bibliography

1. Mamaluy, D. & Gao, X. The fundamental downscaling limit of field effect transistors. *Applied Physics Letters* **106**, 193503. ISSN: 0003-6951. <https://doi.org/10.1063/1.4919871> (May 2015) (cit. on p. 1).
2. Ayala, C. L. *et al.* MANA: A Monolithic Adiabatic iNtegration Architecture Microprocessor Using 1.4-zJ/op Unshunted Superconductor Josephson Junction Devices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* **56**, 1152–1165. ISSN: 1558-173x (Apr. 2021) (cit. on p. 1).
3. Bairamkulov, R. & De Micheli, G. Superconductive Electronics: A 25-Year Review [Feature]. *IEEE Circuits and Systems Magazine* **24**, 16–33. ISSN: 1531-636x, 1558-0830. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10531089/> (2024) (cit. on p. 1).
4. Ruf, L. *et al.* Gate control of superconducting current: Mechanisms, parameters, and technological potential. *Applied Physics Reviews* **11**, 041314. ISSN: 1931-9401. <https://doi.org/10.1063/5.0222371> (Oct. 31, 2024) (cit. on pp. 1, 2).
5. Ruf, L., Scheer, E. & Di Bernardo, A. High-Performance Gate-Controlled Superconducting Switches: Large Output Voltage and Reproducibility. *ACS Nano* **18**, 20600–20610. ISSN: 1936-0851, 1936-086x (Aug. 2024) (cit. on p. 1).
6. Arute, F. *et al.* Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* **574**, 505–510. ISSN: 1476-4687 (Oct. 2019) (cit. on p. 1).
7. Zazunov, A., Shumeiko, V. S., Bratus', E. N., Lantz, J. & Wendin, G. Andreev Level Qubit. *Physical Review Letters* **90**, 087003. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. arXiv: cond-mat/0206342. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0206342> (Feb. 26, 2003) (cit. on p. 1).
8. Hays, M. *et al.* Direct Microwave Measurement of Andreev-Bound-State Dynamics in a Semiconductor-Nanowire Josephson Junction. *Physical Review Letters* **121**, 047001. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.121.047001> (July 23, 2018) (cit. on p. 1).
9. Cheung, L. Y. *et al.* Photon-mediated long range coupling of two Andreev level qubits Oct. 2023 (cit. on p. 1).
10. Lu, H. *et al.* Andreev spin relaxation time in a shadow-evaporated InAs weak link Jan. 2025 (cit. on p. 1).
11. Bargerbos, A. *et al.* Spectroscopy of Spin-Split Andreev Levels in a Quantum Dot with Superconducting Leads. *Physical Review Letters* **131**, 097001 (Aug. 2023) (cit. on p. 1).
12. Wesdorp, J. J. *et al.* Microwave spectroscopy of interacting Andreev spins. *Physical Review B* **109**, 045302 (Jan. 2024) (cit. on p. 1).
13. Pillet, J.-D., Benzoni, V., Griesmar, J., Smirr, J.-L. & Girit, C. O. Nonlocal Josephson Effect in Andreev Molecules. *Nano Letters* **19**, 7138–7143. ISSN: 1530-6984, 1530-6992. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.9b02686> (Oct. 9, 2019) (cit. on pp. 1, 2).
14. Pillet, J.-D., Benzoni, V., Griesmar, J., Smirr, J.-L. & Girit, C. Scattering description of Andreev molecules. *SciPost Physics Core* **2**, 009. ISSN: 2666-9366. https://www.scipost.org/SciPostPhysCore.2.2.009?acad_field_slug=all (June 11, 2020) (cit. on pp. 1, 2).

15. Pillet, J.-D. *et al.* Josephson diode effect in Andreev molecules. *Physical Review Research* **5**, 033199. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.5.033199> (Sept. 20, 2023) (cit. on p. 1).
16. Matsuo, S. *et al.* Josephson diode effect derived from short-range coherent coupling. *Nature Physics* **19**, 1636–1641. ISSN: 1745-2481 (Nov. 2023) (cit. on p. 1).
17. Kürtössy, O. *et al.* Andreev molecule in parallel InAs nanowires. *Nano Letters* **21**, 7929–7937. ISSN: 1530-6984, 1530-6992. arXiv: 2103.14083[cond-mat]. <http://arxiv.org/abs/2103.14083> (Oct. 13, 2021) (cit. on p. 1).
18. Matsuo, S. *et al.* Observation of nonlocal Josephson effect on double InAs nanowires. *Communications Physics* **5**, 1–6. ISSN: 2399-3650. <https://www.nature.com/articles/s42005-022-00994-0> (Sept. 13, 2022) (cit. on p. 1).
19. Haxell, D. Z. *et al.* Demonstration of the Nonlocal Josephson Effect in Andreev Molecules. *Nano Letters* **23**, 7532–7538. ISSN: 1530-6984 (Aug. 2023) (cit. on p. 1).
20. Matsuo, S. *et al.* Phase-dependent Andreev molecules and superconducting gap closing in coherently-coupled Josephson junctions. *Nature Communications* **14**, 8271. ISSN: 2041-1723 (Dec. 2023) (cit. on p. 1).
21. Matsuo, S. *et al.* Phase engineering of anomalous Josephson effect derived from Andreev molecules. *Science Advances* **9**, eadj3698 (Dec. 2023) (cit. on p. 1).
22. Van Driel, D. *et al.* Charge Sensing the Parity of an Andreev Molecule. *PRX Quantum* **5**, 020301 (Apr. 2024) (cit. on p. 1).
23. Kürtössy, O. *et al.* Heteroatomic Andreev molecule in a superconducting island-double quantum dot hybrid June 30, 2024. arXiv: 2407.00825[cond-mat]. <http://arxiv.org/abs/2407.00825> (cit. on p. 1).
24. Zhuo, E. *et al.* Read out the fermion parity of a potential artificial Kitaev chain utilizing a transmon qubit Jan. 23, 2025. arXiv: 2501.13367[cond-mat]. <http://arxiv.org/abs/2501.13367> (cit. on p. 1).
25. Liu, C. *et al.* Quasiparticle Poisoning of Superconducting Qubits from Resonant Absorption of Pair-Breaking Photons. *Physical Review Letters* **132**, 017001 (Jan. 2024) (cit. on p. 1).
26. Liu, C. *et al.* Single Flux Quantum-Based Digital Control of Superconducting Qubits in a Multichip Module. *PRX Quantum* **4**, 030310 (July 2023) (cit. on p. 1).
27. Golubov, A. A., Kupriyanov, M. Y. & Il'ichev, E. The current-phase relation in Josephson junctions. *Reviews of Modern Physics* **76**, 411–469. ISSN: 0034-6861, 1539-0756. <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.76.411> (Apr. 26, 2004) (cit. on p. 2).
28. Krantz, P. *et al.* A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits. *Applied Physics Reviews* **6**, 021318. ISSN: 1931-9401. arXiv: 1904.06560. <http://arxiv.org/abs/1904.06560> (June 2019) (cit. on p. 2).
29. Soloviev, I. I. *et al.* Beyond Moore's technologies: operation principles of a superconductor alternative. *Beilstein Journal of Nanotechnology* **8**, 2689–2710. ISSN: 2190-4286. <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/8/269> (Dec. 2017) (cit. on p. 2).
30. Sauls, J. A. Andreev bound states and their signatures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **376**, 20180140. <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2018.0140> (June 20, 2018) (cit. on p. 2).
31. Bargerbos, A. *et al.* Singlet-Doublet Transitions of a Quantum Dot Josephson Junction Detected in a Transmon Circuit. *PRX Quantum* **3**, 030311. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PRXQuantum.3.030311> (July 21, 2022) (cit. on p. 2).
32. Shvetsov, O. O. *et al.* Approaching the ultrastrong coupling regime between an Andreev level and a microwave resonator Feb. 2025. <http://arxiv.org/abs/2502.09243> (cit. on p. 2).

33. Gorm, S. *YSR states in double quantum dots* PhD thesis (Københavns Universitet Niels Bohr Institute, 2021). <https://nbi.ku.dk/english/theses/phd-theses/gorm-ole-steffensen/Gorm-ole-steffensen.pdf> (cit. on p. 2).