

# FELSZÍNKÖZELI INAS KÉTDIMENZIÓS ELEKTRONGÁZ TRANSZPORT ÉS SZUPRAVEZETŐ TULAJDONSÁGAI

PhD Tézisfüzet

SÜTŐ MÁTÉ

Témavezető: Tóvári Endre  
Tudományos munkatárs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2025



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



---

# 1. Bevezető

A szupravezető elektronika és a kvantumbit (qubit) architektúrák a fizika leggyorsabban fejlődő területei közé tartoznak, melyek keretében az utóbbi évek során jelentős előrelépések történtek [1]. Jelenleg több kvantumszámítógép is működik a világon, ahol az alap építőelemek, a qubitek száma eléri az ezret. Míg a qubitek számának növelése nélkülözhetetlen a mindennapi használhatóság eléréséhez, ugyanolyan fontos, ha nem fontosabb, hogy a qubitek minősége is javuljon. Jelenleg az egyik legjelentősebb kihívást a qubit állapotok korlátozott élettartama jelenti, mely következtében a környezettel való kölcsönhatás miatt hajlamosak a bennük tárolt információ elvesztésére.

Erre a problémára kínálnak megoldást új, szupravezető-félvezető hibrid eszközök. Ezek ötvözik a szupravezetők egyedi tulajdonságait a félvezetők elektromos hangolhatóságával. és lehetőséget nyújtanak olyan innovatív qubitek létrehozására, mint a gatemonok [2, 3, 4, 5, 6, 7], gatemonium [8] vagy akár Andrejev qubitek [9, 10, 11, 12]. Elméleti megfontolások alapján szupravezetők és erős spin-pálya kölcsönhatással rendelkező anyagok párosításával topologikusan védett qubitek létrehozása lehetséges, mely jelentősen növelné élettartamukat [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Noha nanopálcák és kétdimenziós elektrongázok (2DEG) felhasználásával próbáltak már ilyen jellegű, például Majorana qubiteket létrehozni, megkérdőjelezhetetlen bizonyítékuk a mai napig nem létezik. Hasonlóképpen, jóllehet a kvantumpötty-szupravezető alapú Kitaev láncok kutatása jelentős eredményeket ért el a közelmúltban, használatukhoz további fejlesztések szükségesek [20, 21, 22, 23, 24].

Központi eleme ezeknek az eszközöknek egy szupravezető-normál-szupravezető átmenet, avagy Josephson átmenet, ahol a félvezetővel létrehozott normál régióban Andrejev kötött állapotok alakulhatnak ki. Ezen állapotok felelősek az átmenetben folyó szuperáramért, és egyedi diszperziós relációjuknak köszönhetően, mely lehetővé teszi felhasználásukat egy qubit formájában is, több kutatási projektnek kerültek a fókuszpontjába. Ezen állapotok tulajdonságait több különböző eljárás segítségével is intenzíven vizsgálták, mint alagút spektroszkópia [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32], mikrohullámú spektroszkópia [33, 34, 35, 36, 37, 38] vagy szupravezető áram-fázis relációjának mérésén keresztül [39, 40, 41, 42, 43, 44, 45].

Felszínközeli kétdimenziós elektrongázok egy epitaxiálisan növesztett szupravezető réteggel párosítva ideális platformot biztosítanak kvantum bitek létrehozására. Viszonylag magas mobilitással, erős spin-pálya kölcsönhatással, valamint a 2DEG felszínhez való közelsége miatt kiváló szupravezető-félvezető határfelülettel is rendelkeznek [46, 47, 48]. Ezen rendszerek ígéretes jelöltek kvantumszámítógépek létrehozására [5, 49, 50, 51], így az utóbbi évek során az irántuk való érdeklődés jelentősen megnőtt.

2DEG-ek létrehozása során az egyik legnépszerűbb félvezető anyag az indium-arszenid (InAs), mely nanopálca formájában már bizonyította kiváló minőségét Majorana-alapú eszközök kutatása során [52]. Azonban a nanopálcák limitált felskálázhatósága jelentős kihívásokhoz vezet a kezdeti karakterizációk után. Ennek következtében a fókusz az InAs alapú 2DEG-ek felé fordult, amik rugalmasabb eszköz geometriát és skálázhatóságot ígérnek, megtartva az InAs nanopálcák hasznos tulajdonságait [17, 18]. A kezdeti InAs 2DEG-ek növesztése gallium-antimonid (GaSb) vagy indium-foszfid (InP) hordozókra történt [53, 54, 55]. Ezek közül az InP a technológiai szempontból jobb választás. Azonban a gallium-arszenid (GaAs) hasonlóan megfelelő, míg olcsóbb és nagyobb ellenállású, mint az InP, utóbbi kiemelt fontosságú nagyfrekvenciás alkalmazások során. Ennek következtében

---

a GaAs előnyösebb kvantumszámítógép esetén, hiszen itt mind a qubit manipuláció, mind a kiolvasás a GHz-es frekvenciatartományban történik.

## 2. Kutatási céljaim

Tézisem során céлом egy új, GaAs alapú InAs 2DEG alkalmasságának vizsgálat volt kvantum áramkörök elkészítéséhez. Ez magában foglalja a heterostruktúra alapvető transzport karakterizációját, valamint szupravezető-félvezető eszközök vizsgálatát. Mivel hasonló platformok kevesebb, mint egy évtizede vannak jelen a fizikában [46, 56], kutatócsoportunkban előttem senki nem foglalkozott velük. Emiatt módosítanom kellett a más rendszerekre optimalizált mintakészítési eljárásainkat, majd visszajelzést küldeni a növesztőcsoportnak a 2DEG minőségéről több különböző mérés (pásztázó és alagút elektron mikroszkópia, transzport mérések) alapján, melyek segítettek a növesztési folyamat véglegesítésében. Ezen tesztek tartalmazzák a heterostruktúra ellenállóképességének vizsgálatát az Al marási lépés során, mely korai jelentések szerint képes a 2DEG minőségének lerontására [56].

Legfőbb célom az volt, hogy megállapítsam a rendszer alkalmasságát Andrejev kötött állapotok vizsgálatára az egy vezetési csatornás határesetben. 2DEG-ek esetén a vezetőképeség korlátozása kvantum pontkontaktus (QPC) segítségével megvalósítható [57], így első célom ezen eszköz elkészítése lett. Ehhez a mintában ballisztikus transzport szükséges, amihez hosszú szabad úthosszra van szükségünk. Ennek ellenőrzésére szolgálnak az alacsony hőmérsékletű mágnesesellenállás mérések kis mágneses tér esetén, melyeket felhasználva meghatározható a minta mobilitása és szabad úthossza. A heterostruktúrát nagyobb mágneses tereknél vizsgálva, a Shubnikov-de Haas oszcillációk hőmérsékletfüggésén keresztül információt nyerhetünk a rendszer rendezetlenségi potenciáljáról, valamint a töltéshordozók effektív tömegéről [58, 59, 60]. Megfelelően hosszú szabad úthossz esetén, mely megközelítőleg pár 100 nm-nek felel meg, a 2DEG alkalmas lehet QPC létrehozására, mellyel vezetőképeség-quantálás érhető el.

A 2DEG megfelelő minőségén felül, kvantum áramkörök készítéséhez elengedhetetlen egy jó minőségű, átlátszó határfelületű szupravezető jelenléte. Ezen tézis keretében ezt a feladatot egy epitaxiálisan növesztett alumínium (Al) réteg látja el. Hogy minősítsem mind az Al, mind határfelületének minőségét, második feladatom egy Josephson átmenet elkészítése volt, melyben a többszörös Andrejev visszaverődés vizsgálatával meghatározható a 2DEG indukált szupravezető tiltott sávjának nagysága. Ezt követően a Josephson átmenet és egy QPC kombinálása az első lépés az egycsatornás Andrejev kötött állapotok létrehozása felé.

Az Andrejev kötött állapotok vizsgálatának egy másik módszere a nagyfrekvenciás mérés technikán alapul. Ezért harmadik célom az epitaxiális Al réteg felhasználásával szupravezető rezonátorok fabrikálása és rádiófrekvenciás szupravezető kvantum interferenciaeszközökhöz (RF SQUID-ek) való csatolása volt. A rezonanciafrekvencia mágneses tér függésén keresztül meghatározható az RF SQUID-be ágyazott Josephson átmenet áram-fázis relációja, mellyel megbecsülhető az átmenet transzmissziója.

---

## Tézispontjaim

- T1 Első tézispontom keretében egy GaAs-re növesztett felszínközeli InAs 2DEG-et vizsgáltam alacsonyhőmérsékletű (1.5-50 K) mágnesesellenállás mérések segítségével.** Miután biztosítottam, hogy a félvezetőben egyetlen vezetési csatorna van jelen, meghatároztam a 2DEG mobilitását ( $\mu \approx 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ) és szabad úthosszát ( $l_m \approx 1 \mu\text{m}$ ). Ezen értékekre az epitaxiális Al réteg eltávolítása nem volt hatással. A Shubnikov-de Haas oszcillációk vizsgálatának segítségével megállapítottam a Dingle hőmérsékletet, melyet felhasználva kiszámoltam az elasztikus szórásidőt, ami megközelítőleg hússzorosa lett a transzport szórásidőnek. Ezt követően kapuelektrodával ellátott mintákat készítettem, melyekben mobilitáscsökkenést ( $(8 - 13) \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ -ról  $(2 - 4) \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ -ra) és megemelkedett Dingle hőmérsékletet (17-28 K-ről 38-50 K-re) mértem, utalva a megnövekedett visszaszóródásra és rendezetlenségre a félvezetőben. Végezetül kvantum-pontkontaktussal ellátott mintákat készítettem, melyekben vezetőképesség kvantálást figyeltem meg egészen  $G = 8 e^2/h$ -ig. A kvantum-Hall tartományban DC feszültség spektroszkópiát felhasználva meghatároztam a 2DEG  $g$ -faktorát,  $|g_{\perp}| = 15.8$ .
- T2 Második tézispontom keretében a felszínközeli InAs 2DEG és epitaxiális Al rétegek felhasználásával Josephson átmeneteket készítettem, melyeket millikelvines környezetben tanulmányoztam.** Kapuelektroda nélküli eszközökben  $0.5 \mu\text{m}$  hossz és  $4 \mu\text{m}$  szélesség esetén  $0.15 \mu\text{A}$  nagyságú szuperáramot tapasztaltam, mely kapuelektrodával ellátott esetben jól hangolhatóvá vált, és  $0.3 \mu\text{m}$  hosszú és  $9 \mu\text{m}$  széles átmenetknél elérte a  $1.5 \mu\text{A}$ -t. A mérések során megjelenő többszörös Andrejev visszaverődés segítségével meghatároztam a 2DEG-ben indukált szupravezető tiltott sáv nagyságát, melyre  $\Delta^* = 125 \mu\text{eV}$ -t kaptam. Szupravezető interferenciamérések Fraunhofer mintázatot eredményeztek, mely a minta homogenitásának bizonyítéka. Ezen mintázat periódusát felhasználva megbecsültem az átmenet effektív hosszát, mely az elvártaknál jelentősen nagyobb lett, utalva a szupravezető  $\mu\text{m}$ -es Pearl hosszára. A Josephson átmenetet QPC-vel párosítva véges szuperáramot mértem a szűkületben. Ezzel egyidőben a szupravezető interferenciamérés Gauss-görbe alakot eredményezett, megmutatva a szuperáram térbeli eloszlásának megváltozását a QPC-ben.
- T3 Harmadik tézispontom keretében az epitaxiális Al rétegből szupravezető rezonátort készítettem, melyet egy az InAs 2DEG-et felhasználó RF SQUID-hez csatoltam.** Ezt követően millikelvines hőmérsékleten a mágneses tér függvényében a rezonanciafrekvencia periodikus modulációját tapasztaltam. Ennek felhasználásával meghatározható a Josephson átmenet áram-fázis relációja, ami alapján az Andrejev kötött állapotok átlagos transzmissziójának maximumát  $\tau = 0.72$ -re becsültük. Egy a 2DEG-re merőleges mágneses tér segítségével szuperáram-interferencia méréseket hajtottunk végre, melyek során a rezonanciafrekvencia burkolójával egy Fraunhofer mintázatot kaptunk. Síkbeli mágneses tér felhasználása esetén a Fraunhofer mintázat irányfüggő aszimmetriát mutatott. Ezen eszközeinkben a belső jósági tényezőt  $Q_i \approx 1000$ -re becsültük, ami egy nagyságrenddel kisebb, mint az RF SQUID és dielektrikum réteg nélküli referenciaminták értéke.

---

## Publikációim listája

**T1-2:** Máté Sütő, Tamás Prok, Péter Makk, Magdhi Kirti, Giorgio Biasiol, Szabolcs Csonka, and Endre Tóvári. Near-surface InAs two-dimensional electron gas on a Ga-As substrate: Characterization and superconducting proximity effect. *Phys. Rev. B*, 106:235404, Dec 2022.

**T1-2:** Magdhi Kirti, Máté Sütő, Endre Tóvári, Péter Makk, Tamás Prok, Szabolcs Csonka, Pritam Banerjee, Piu Rajak, Regina Ciancio, Jasper R. Plaisier, Pietro Parisse and Giorgio Biasiol. Optimization of In-Situ Growth of Superconducting Al/InAs Hybrid Systems on GaAs for the Development of Quantum Electronic Circuits. *Materials* 2025, 18, 385.

**T3:** Zoltán Scherübl, Máté Sütő, Dávid Kóti, Endre Tóvári, Csaba Horváth, Tamás Kalmár, Bence Vasas, Martin Berke, Magdhi Kirti, Giorgio Biasiol, Szabolcs Csonka, Péter Makk, and Gergő Fülöp. Determination of the current-phase relation of an InAs 2DEG Josephson junction with a microwave resonator. *Phys. Rev. Res.*, 7:023173, May 2025.

## Hivatkozások

- [1] Morten Kjaergaard, Mollie E. Schwartz, Jochen Braumüller, Philip Krantz, Joel I.J. Wang, Simon Gustavsson, and William D. Oliver. Superconducting Qubits: Current State of Play. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 11:369–395, 3 2020.
- [2] T. W. Larsen, K. D. Petersson, F. Kuemmeth, T. S. Jespersen, P. Krogstrup, J. Nygård, and C. M. Marcus. Semiconductor-Nanowire-Based Superconducting Qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 115:127001, Sep 2015.
- [3] William M. Strickland et al. Characterizing losses in InAs two-dimensional electron gas-based gatemon qubits. *Phys. Rev. Res.*, 6:023094, Apr 2024.
- [4] G. de Lange, B. van Heck, A. Bruno, D. J. van Woerkom, A. Geresdi, S. R. Plissard, E. P. A. M. Bakkers, A. R. Akhmerov, and L. DiCarlo. Realization of Microwave Quantum Circuits Using Hybrid Superconducting-Semiconducting Nanowire Josephson Elements. *Phys. Rev. Lett.*, 115:127002, Sep 2015.
- [5] Lucas Casparis et al. Superconducting gatemon qubit based on a proximitized two-dimensional electron gas. *Nature Nanotechnology*, 13:915–919, 10 2018.
- [6] Han Zheng et al. Coherent Control of a Few-Channel Hole Type Gatemon Qubit. *Nano Letters*, 24:7173 – 7179, 2023.
- [7] Oliver Sagi et al. A gate tunable transmon qubit in planar Ge, 3 2024.
- [8] William M. Strickland, Bassel Heiba Elfeky, Lukas Baker, Andrea Maiani, Jaewoo Lee, Ido Levy, Jacob Issokson, Andrei Vrajitoarea, and Javad Shabani. Gatemonium: A Voltage-Tunable Fluxonium, 6 2024.

- 
- [9] M. Hays, V. Fatemi, K. Serniak, D. Bouman, S. Diamond, G. de Lange, P. Krogstrup, J. Nygård, A. Geresdi, and M. H. Devoret. Continuous monitoring of a trapped superconducting spin. *Nature Physics* 2020 16:11, 16:1103–1107, 7 2020.
- [10] M. Hays et al. Coherent manipulation of an Andreev spin qubit. *Science*, 373(6553):430–433, 2021.
- [11] Marta Pita-Vidal et al. Direct manipulation of a superconducting spin qubit strongly coupled to a transmon qubit. *Nature Physics* 2023 19:8, 19:1110–1115, 5 2023.
- [12] Marta Pita-Vidal, Jaap J. Wesdorp, Lukas J. Splitthoff, Arno Bargerbos, Yu Liu, Leo P. Kouwenhoven, and Christian Kraglund Andersen. Strong tunable coupling between two distant superconducting spin qubits. *Nature Physics* 2024, pages 1–6, 5 2024.
- [13] V. Mourik, K. Zuo, S. M. Frolov, S. R. Plissard, E. P.A.M. Bakkers, and L. P. Kouwenhoven. Signatures of majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices. *Science*, 336:1003–1007, 5 2012.
- [14] Sankar Das Sarma, Michael Freedman, and Chetan Nayak. Majorana zero modes and topological quantum computation. *npj Quantum Information* 2015 1:1, 1:1–13, 10 2015.
- [15] M. T. Deng, S. Vaitiekenas, E. B. Hansen, J. Danon, M. Leijnse, K. Flensberg, J. Nygård, P. Krogstrup, and C. M. Marcus. Majorana bound state in a coupled quantum-dot hybrid-nanowire system. *Science*, 354:1557–1562, 12 2016.
- [16] Ramón Aguado. Majorana quasiparticles in condensed matter. *Rivista del Nuovo Cimento*, 40:523–593, 11 2017.
- [17] Antonio Fornieri, Alexander M. Whiticar, F. Setiawan, Elías Portolés, Asbjørn C.C. Drachmann, Anna Keselman, Sergei Gronin, Candice Thomas, Tian Wang, Ray Kallaher, Geoffrey C. Gardner, Erez Berg, Michael J. Manfra, Ady Stern, Charles M. Marcus, and Fabrizio Nichele. Evidence of topological superconductivity in planar Josephson junctions. *Nature*, 569(7754):89–92, 2019.
- [18] Matthieu C. Dartiailh, William Mayer, Joseph Yuan, Kaushini S. Wickramasinghe, Alex Matos-Abiague, Igor Žutić, and Javad Shabani. Phase Signature of Topological Transition in Josephson Junctions. *Phys. Rev. Lett.*, 126:036802, Jan 2021.
- [19] Morten Amundsen, Jacob Linder, Jason W.A. Robinson, Igor Žutić, and Niladri Banerjee. Colloquium: Spin-orbit effects in superconducting hybrid structures. *Reviews of Modern Physics*, 96:021003, 4 2024.
- [20] Jay D. Sau and S. Das Sarma. Realizing a robust practical majorana chain in a quantum-dot-superconductor linear array. *Nature Communications* 2012 3:1, 3:1–6, 7 2012.

- 
- [21] Martin Leijnse and Karsten Flensberg. Parity qubits and poor man’s Majorana bound states in double quantum dots. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 86:134528, 10 2012.
- [22] Francesco Zatelli et al. Robust poor man’s Majorana zero modes using Yu-Shiba-Rusinov states, 11 2023.
- [23] Tom Dvir et al. Realization of a minimal Kitaev chain in coupled quantum dots. *Nature* 2023 614:7948, 614:445–450, 2 2023.
- [24] Sebastiaan L.D. ten Haaf et al. A two-site Kitaev chain in a two-dimensional electron gas. *Nature* 2024 630:8016, 630:329–334, 6 2024.
- [25] M. R. Buitelaar, T. Nussbaumer, and C. Schönenberger. Quantum Dot in the Kondo Regime Coupled to Superconductors. *Physical Review Letters*, 89:256801, 12 2002.
- [26] J. D. Pillet, C. H.L. Quay, P. Morfin, C. Bena, A. Levy Yeyati, and P. Joyez. Andreev bound states in supercurrent-carrying carbon nanotubes revealed. *Nature Physics* 2010 6:12, 6:965–969, 11 2010.
- [27] Eduardo J.H. Lee, Xiaocheng Jiang, Manuel Houzet, Ramón Aguado, Charles M. Lieber, and Silvano De Franceschi. Spin-resolved Andreev levels and parity crossings in hybrid superconductor–semiconductor nanostructures. *Nature Nanotechnology* 2013 9:1, 9:79–84, 12 2013.
- [28] Anders Jellinggaard, Kasper Grove-Rasmussen, Morten Hannibal Madsen, and Jesper Nygård. Tuning Yu-Shiba-Rusinov states in a quantum dot. *Physical Review B*, 94:064520, 8 2016.
- [29] Landry Bretheau, Joel I.Jan Wang, Riccardo Pisoni, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Pablo Jarillo-Herrero. Tunnelling spectroscopy of Andreev states in graphene. *Nature Physics* 2017 13:8, 13:756–760, 5 2017.
- [30] Joel I.Jan Wang, Landry Bretheau, Daniel Rodan-Legrain, Riccardo Pisoni, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Pablo Jarillo-Herrero. Tunneling spectroscopy of graphene nanodevices coupled to large-gap superconductors. *Physical Review B*, 98:1–5, 2018.
- [31] Elsa Prada, Pablo San-Jose, Michiel W.A. de Moor, Attila Geresdi, Eduardo J.H. Lee, Jelena Klinovaja, Daniel Loss, Jesper Nygård, Ramón Aguado, and Leo P. Kouwenhoven. From Andreev to Majorana bound states in hybrid superconductor–semiconductor nanowires. *Nature Reviews Physics* 2020 2:10, 2:575–594, 9 2020.
- [32] David van Driel et al. Spin-filtered measurements of Andreev bound states in semiconductor-superconductor nanowire devices. *Nature Communications* 2023 14:1, 14:1–9, 10 2023.
- [33] L. Bretheau, Ç Ö Girit, H. Pothier, D. Esteve, and C. Urbina. Exciting Andreev pairs in a superconducting atomic contact. *Nature* 2013 499:7458, 499:312–315, 7 2013.

- 
- [34] David J. Van Woerkom, Alex Proutski, Bernard Van Heck, Daniël Bouman, Jukka I. Väyrynen, Leonid I. Glazman, Peter Krogstrup, Jesper Nygård, Leo P. Kouwenhoven, and Attila Geresdi. Microwave spectroscopy of spinful Andreev bound states in ballistic semiconductor Josephson junctions. *Nature Physics* 2017 13:9, 13:876–881, 6 2017.
- [35] B. Dassonneville, A. Murani, M. Ferrier, S. Guéron, and H. Bouchiat. Coherence-enhanced phase-dependent dissipation in long SNS Josephson junctions: Revealing Andreev bound state dynamics. *Phys. Rev. B*, 97:184505, May 2018.
- [36] L. Tosi, C. Metzger, M. F. Goffman, C. Urbina, H. Pothier, Sunghun Park, A. Levy Yeyati, J. Nygård, and P. Krogstrup. Spin-Orbit Splitting of Andreev States Revealed by Microwave Spectroscopy. *Phys. Rev. X*, 9:011010, Jan 2019.
- [37] Vivek Chidambaram et al. Microwave sensing of Andreev bound states in a gate-defined superconducting quantum point contact. *Phys. Rev. Res.*, 4:023170, May 2022.
- [38] M. Hinderling et al. Flip-Chip-Based Microwave Spectroscopy of Andreev Bound States in a Planar Josephson Junction. *Phys. Rev. Appl.*, 19:054026, May 2023.
- [39] D. B. Szombati, S. Nadj-Perge, D. Car, S. R. Plissard, E. P.A.M. Bakkers, and L. P. Kouwenhoven. Josephson  $\phi_0$ -junction in nanowire quantum dots. *Nature Physics* 2016 12:6, 12:568–572, 5 2016.
- [40] G. Nanda, J. L. Aguilera-Servin, P. Rakyta, A. Kormányos, R. Kleiner, D. Koelle, K. Watanabe, T. Taniguchi, L. M. K. Vandersypen, and S. Goswami. Current-Phase Relation of Ballistic Graphene Josephson Junctions. *Nano Letters*, 17(6):3396–3401, 2017. PMID: 28474892.
- [41] Eric M Spanton, Mingtang Deng, Saulius Vaitiekėnas, Peter Krogstrup, Jesper Nygård, Charles M Marcus, and Kathryn A Moler. Current–phase relations of few-mode InAs nanowire Josephson junctions. *Nat. Phys.*, 13(12):1177–1181, dec 2017.
- [42] M. L. Della Rocca, M. Chauvin, B. Huard, H. Pothier, D. Esteve, and C. Urbina. Measurement of the Current-Phase Relation of Superconducting Atomic Contacts. *Phys. Rev. Lett.*, 99:127005, Sep 2007.
- [43] David I. Indolese, Paritosh Karnatak, Artem Kononov, Raphaëlle Delagrèze, Roy Haller, Lujun Wang, Péter Makk, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, and Christian Schönenberger. Compact SQUID Realized in a Double-Layer Graphene Heterostructure. *Nano Letters*, 20:7129–7135, 10 2020.
- [44] R. Haller et al. Phase-dependent microwave response of a graphene Josephson junction. *Phys. Rev. Res.*, 4:013198, Mar 2022.
- [45] Daniel Z. Haxell, Marco Coraiola, Deividas Sabonis, Manuel Hinderling, Sofieke C. ten Kate, Erik Cheah, Filip Krizek, Rüdiger Schott, Werner Wegscheider, and Fabrizio Nichele. Zeeman- and Orbital-Driven Phase Shifts in Planar Josephson Junctions. *ACS Nano*, 17(18):18139–18147, September 2023.

- 
- [46] M. Kjaergaard, F. Nichele, H. J. Suominen, M. P. Nowak, M. Wimmer, A. R. Akhmerov, J. A. Folk, K. Flensberg, J. Shabani, C. J. Palmstrøm, and C. M. Marcus. Quantized conductance doubling and hard gap in a two-dimensional semiconductor–superconductor heterostructure. *Nature Communications*, 7(1):1–6, sep 2016.
- [47] H. J. Suominen, M. Kjaergaard, A. R. Hamilton, J. Shabani, C. J. Palmstrøm, C. M. Marcus, and F. Nichele. Zero-Energy Modes from Coalescing Andreev States in a Two-Dimensional Semiconductor-Superconductor Hybrid Platform. *Physical Review Letters*, 119:176805, oct 2017.
- [48] Christian M. Moehle, Chung Ting Ke, Qingzhen Wang, Candice Thomas, Di Xiao, Saurabh Karwal, Mario Lodari, Vincent Van De Kerkhof, Ruben Termaat, Geoffrey C. Gardner, Giordano Scappucci, Michael J. Manfra, and Srijit Goswami. InSbAs Two-Dimensional Electron Gases as a Platform for Topological Superconductivity. *Nano Letters*, 21(23):9990–9996, dec 2021.
- [49] A Yu Kitaev. Unpaired Majorana fermions in quantum wires. *Physics-Uspekhi*, 44(10S):131, oct 2001.
- [50] Yuval Oreg, Gil Refael, and Felix von Oppen. Helical liquids and Majorana bound states in quantum wires. *Physical Review Letters*, 105(17):177002, oct 2010.
- [51] Roman M. Lutchyn, Jay D. Sau, and S. Das Sarma. Majorana fermions and a topological phase transition in semiconductor-superconductor heterostructures. *Physical Review Letters*, 105(7):077001, aug 2010.
- [52] S. M. Albrecht, A. P. Higginbotham, M. Madsen, F. Kuemmeth, T. S. Jespersen, J. Nygård, P. Krogstrup, and C. M. Marcus. Exponential protection of zero modes in Majorana islands. *Nature*, 531(7593):206–209, mar 2016.
- [53] T. Tschirky, S. Mueller, Ch A. Lehner, S. Fält, T. Ihn, K. Ensslin, and W. Wegscheider. Scattering mechanisms of highest-mobility InAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb quantum wells. *Physical Review B*, 95(11):115304, mar 2017.
- [54] Joseph Yuan, Mehdi Hatefipour, Brenden A. Magill, William Mayer, Matthieu C. Dartiailh, Kasra Sardashti, Kaushini S. Wickramasinghe, Giti A. Khodaparast, Yasuhiro H. Matsuda, Yoshimitsu Kohama, Zhuo Yang, Sunil Thapa, Christopher J. Stanton, and Javad Shabani. Experimental measurements of effective mass in near-surface InAs quantum wells. *Physical Review B*, 101(20):205310, may 2020.
- [55] Kaushini S. Wickramasinghe, William Mayer, Joseph Yuan, Tri Nguyen, Lucy Jiao, Vladimir Manucharyan, and Javad Shabani. Transport properties of near surface InAs two-dimensional heterostructures. *Applied Physics Letters*, 113(26):262104, dec 2018.
- [56] J. Shabani et al. Two-dimensional epitaxial superconductor-semiconductor heterostructures: A platform for topological superconducting networks. *Phys. Rev. B*, 93:155402, Apr 2016.

- 
- [57] B. J. van Wees, H. van Houten, C. W. J. Beenakker, J. G. Williamson, L. P. Kouwenhoven, D. van der Marel, and C. T. Foxon. Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas. *Phys. Rev. Lett.*, 60:848–850, Feb 1988.
- [58] D. (David) Shoenberg. *Magnetic oscillations in metals*. Cambridge University Press, 2009.
- [59] Tsuneya Ando, Alan B. Fowler, and Frank Stern. Electronic properties of two-dimensional systems. *Rev. Mod. Phys.*, 54:437–672, Apr 1982.
- [60] M. Monteverde, C. Ojeda-Aristizabal, R. Weil, K. Bennaceur, M. Ferrier, S. Guéron, C. Glattli, H. Bouchiat, J. N. Fuchs, and D. L. Maslov. Transport and elastic scattering times as probes of the nature of impurity scattering in single-layer and bilayer graphene. *Phys. Rev. Lett.*, 104:126801, Mar 2010.