



Tézisfüzet

Kétdimenziós hibrid nanostruktúrák vizsgálata

KEDVES MÁTÉ

Témavezető Dr. Makk Péter
Docens
Fizika tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
2025

Bevezetés

A félvezetőipar az elektronikai eszközök folyamatos méretcsökkentése miatt egy olyan határhoz közeledik, ahol a Moore-törvény [1] fenntartása egyre nehezebbé válik [2]. Az elektronikai eszközök funkcionalitásának további növeléséhez a kvantummechanika eredményeire épülő alternatív megközelítésekre van szükség. Például, az utóbbi években biztató eredmények születtek a kvantumszámítások területén. Ezek közül kiemelendő, hogy szupravezető struktúrákon alapuló [3, 4] és fotonikus rendszereken [5] sikerült demonstrálni a kvantumszámítógépek előnyét a klasszikus számítógépekhez képest bizonyos problémák megoldására. A skálázható és programozható kvantumszámítógépek létrehozására a szupravezető qubitek jelentik az egyik legígéretesebb platformot, amelyek segítségével elérhetővé válhat gyakorlati szempontból is hasznos problémák megoldása. Továbbá, elméleti jóslatok alapján szupravezető hibrid eszközökben létrehozhatóak egzotikus kvázirészecskék, például Majorana-fermionok [6–8], amelyek lehetővé tehetik a hibátűrő kvantumszámítás elérését [9]. Például Majorana-fermionok jöhetnek létre, ha szupravezető korrelációt indukálunk topológikus szigetelők felületi állapotában [7].

Röviddel 2004-es felfedezése után elméletileg megjósolták grafénben egy topológikus szigetelő állapot jelenlétét a saját spin-pálya kölcsönhatása következtében [10]. Azonban ennek az egzotikus fázisnak a kísérleti megfigyelése grafénben nem volt lehetséges, annak nagyon gyenge spin-pálya kölcsönhatása miatt [11]. Ugyanakkor a kétdimenziós (2D) anyagok családja az elmúlt két évtizedben gyorsan növekedett, lehetővé téve a grafén fizikai tulajdonságainak testreszabását grafént és más 2D anyagokat ötvöző van der Waals heteroszerkezetek létrehozásával. Például, ha a grafént ilyen heteroszerkezetekben átmenetifém-dikalkogének (transition metal dichalcogenide, TMD) közelébe helyezzük, abban nagy spin-pálya kölcsönhatás indukálható [12]. Ez jelentős lendületet adott a spintronikai kutatásoknak. A grafén nagy spin-diffúziós hosszának [13–15] és a spinek elektromos térrel történő manipulálásának [16–18] kombinációja lehetővé teszi az elektronok spin információját felhasználó információátviteli és logikai eszközök megvalósítását [19]. Másrészt ez az úgynevezett közelségindukált spin-pálya kölcsönhatás új lehetőségeket nyitott meg a topológikus fázisok vizsgálatára grafénben [20–22]. Lehetővé tette kétrétegű grafénben egy sávinvertált fázis kísérleti megfigyelését, amelyben helikális élállapotok megjelenése várható [23, 24]. Ezenkívül az indukált spin-pálya kölcsönhatás jelentősen befolyásolhatja a csavart szerkezetekben megfigyelt korrelált fázisokat is [25–27].

Cékitűzések

Közelségindukált spin-pálya kölcsönhatás vizsgálata grafénben

Grafén és más, nagy spin-pálya kölcsönhatással rendelkező 2D anyagok kombinálásával lehetővé válik nagy spin-pálya kölcsönhatás indukálása grafénben [12, 28–31]. Habár számos egyéb módszer létezik a grafén spin-pálya kölcsönhatásának növelésére [19, 32, 33], a TMD-k ígéretes jelöltek, hogy lehetővé tegyék a graféneken alapuló eszközök spintronikai alkalmazását. Elméletileg [29] és kísérletileg [12, 31] is megmutatták, hogy grafén/TMD heterostruktúrák segítségével nagy spin-pálya kölcsönhatás hozható létre a grafénben, annak kiváló elektromos tulajdonságainak megtartása mellett. A TMD-k közül WS_2 [12, 34], MoS_2 [34] és WSe_2 [34, 35] esetében is megmutatták, hogy az indukált spin-pálya kölcsönhatás elérheti az $\sim 1 - 10$ meV értéket, ami nagyságrendekkel meghaladja a

grafén saját spin-pálya kölcsönhatásának nagyságát.

Létrehoztam olyan van der Waals heterostruktúrákat, amelyekben egy- és kétrétegű grafén kombinálható WSe_2 rétegekkel. Ezek a heterostruktúrák lehetővé tették az indukált spin-pálya kölcsönhatás vizsgálatát alacsony hőmérsékletű transzportmérésekkel. A kutatócsoportunkban korábban kifejlesztett módszer segítségével ilyen van der Waals heterostruktúrák hidrosztatikai nyomás alatt vizsgálhatóak. Ezen módszer segítségével megmutattam, hogy az indukált spin-pálya kölcsönhatás nagysága megnövelhető kétrétegű grafén/ WSe_2 heterostruktúrákban, illetve megvizsgáltam a hidrosztatikai nyomás hatását az indukált spin-pálya kölcsönhatás hatására létrejövő sávinvertált fázisra.

Áram-fázis reláció mérések grafén/ WSe_2 heterostruktúrákban

A két szupravezető kontaktusból és azokat összekötő szigetelő vagy egyéb nem szupravezető rétegből álló Josephson átmenetek alkotják napjaink szupravezető qubitjainak alapját [3, 4]. Egy Josephson átmenet legalapvetőbb tulajdonsága az áram-fázis reláció (current-phase relation, CPR), ami összeköti a szupravezető kontaktusok makroszkopikus fázisát és az összekötő rétegben létrehozható szuperáram nagyságát. Ezáltal a CPR információt szolgáltat a szupravezetés mögött álló fizikai folyamatokról. Továbbá, a CPR érzékeny lehet spin-pálya kölcsönhatás jelenlétére az összekötő rétegben [36]. A spin-pálya kölcsönhatás jelenléte utat nyithat az anomális Josephson effektus megjelenéséhez, ami a CPR-ben megjelenő fázistolások formájában jelentkezik [37–40]. Továbbá, szupravezető dióda effektus kialakulását is okozhatja, ami az elérhető legnagyobb szuperáram, az ún. kritikus áram áramiránytól való függésében jelentkezik [40–48].

Megmértem különböző grafén/ WSe_2 heterostruktúrák áram-fázis relációját két Josephson átmenetből álló aszimmetrikus SQUID eszközök segítségével. Ezekben az eszközökben a szupravezető hurok induktivitása jelentősen befolyásolhatja a mért áram-fázis relációt. Ezt figyelembe véve, megvizsgáltam a CPR-ben síkbeli mágeneses tér hatására jelentkező fázistolásokat és a módszer limitációit kis fázistolások mérése esetén.

Többterminálos Josephson átmenetek

Egy közös szórótartományhoz kapcsolt több szupravezető kontaktusból álló ún. többterminálos Josephson átmenetek (multiterminal Josephson junction, MTJJ) az utóbbi időben egyre növekvő figyelemben részesülnek. Elméleti munkák megmutatták, hogy az MTJJ-k esetében kialakuló Andrejev kötött állapotok spektruma topológiaiag nemtriviális lehet és a Weyl-félfémek sávszerekezetével analóg tulajdonságokat mutathat [49].

Megvizsgáltam egy grafénen alapuló háromterminálos Josephson átmenetet alacsony hőmérsékletű transzportmérésekkel. Megmutattam, hogy szuperáram és normál áram együttes jelenléte a mintában jelentős fűtési effektusokhoz vezet. Ezen minták viselkedése leírható egy rezisztíven söntölt Josephson átmeneteket tartalmazó hálózat segítségével. Megmutattam, hogy a szimulációk és mérések közötti egyezés jelentősen javítható, ha az előbbi fűtési effektusokat is figyelembe vesszük. A kapcsolási áram statisztikájának mérésével az eszköz kapcsolási dinamikáját is vizsgáltam.

Tézispontok

1. Létrehoztam egyrétegű grafénen, hexagonális bór-nitriden (hBN) és volfrám-diszeleniden (WSe_2) alapuló van der Waals heterostrukturákat. Ezek egyike lehetővé tette munkatársaink számára a WSe_2 által a grafénben indukált spin—pálya kölcsönhatáshoz köthető spinrelaxációs idők vizsgálatát a momentumrelaxációs idő függvényében, ami által a vonatkozó spinrelaxációs mechanizmus azonosítható lett. Ezek az eredmények szerepelnek a [T1] publikációban. Szintén elkészítettem egy egyrétegű grafénből és hBN-ből álló heterostrukturát, amit felhasználva kutatócsoportunk a [T2] publikációban megmutatta, hogy a hBN segítségével a grafén megvédhető az indukált spin—pálya kölcsönhatás megnövelésére használt nyomáscellában alkalmazott kerozintól. Továbbá, a [T3] publikációban, alacsony hőmérsékletű transzportmérésekkel megmutattam, hogy kétrétegű grafénben a kétoldali WSe_2 -enkapszuláció hatására kialakuló sávinvertált fázis hidrosztatikai nyomás segítségével kiterjeszthető. Ezen a WSe_2 /kétrétegű grafén/ WSe_2 heterostrukturán végzett hőmérsékleti aktivációs mérésekkel meghatároztam az indukált spin—pálya kölcsönhatás nagyságát hidrosztatikai nyomással és anélkül, illetve Landau szintek degenerációs pontjainak mérésével is igazoltam a spin—pálya kölcsönhatás megnövekedését a hidrosztatikai nyomás hatására. [T3]
2. Egy- és kétrétegű grafént, hBN-et illetve WSe_2 -et tartalmazó heterostrukturákon alapuló Josephson-átmetekből szupravezető kvantum-interferencia készülékeket (SQUID-eket) készítettem, amelyek segítségével áram—fázis reláció méréseket végeztem. WSe_2 /egyrétegű grafén/ WSe_2 heterostrukturát tartalmazó Josephson átmenet esetén az áram—fázis reláció mérésekkel megmutattam, hogy a ballisztikus viselkedésből származó Fabry-Perot interferencia okozta ellenállásoscillációk a szupravezető kritikus áramban is kimutathatóak. Továbbá, ezen mérésekkel megmutattam, hogy nagy dőpolás esetén az áram—fázis reláció nem-szinuszos jellege felerősödik, ami a vezetési csatornák nagy transzparenciájára utal. Szintén megmutattam, hogy a p—n átmenetek kialakulása, amelyek a FP oszcillációkat is okozzák, a bipoláris tartományban csökkentik az áram—fázis reláció nem-szinuszoságát. Ezen kívül megvizsgáltam az áram—fázis reláció fázistolásait síkbeli mágneses tér alkalmazása esetén. A mágneses tér növelésével olyan fázistolásokat mutattam meg, amik nem magyarázhatóak a minta nem tökéletes orientációjából eredő vagy induktív hatásokkal. Ezen mérések kapcsán megmutattam a fázistolás méréseinek gyakorlati limitációit. [T4]
3. Létrehoztam grafénen és hBN-en alapuló háromterminálos Josephson-átmeneteket és egy mintán alacsony hőmérsékletű transzportméréseket végeztem. Megmutattam, hogy ezen minták viselkedése a mérésekben leírható egy rezisztíven söntölt Josephson-átmeneteket tartalmazó hálózat modelljével. A modell kapcsán megmutattam, hogy mérésekkel pontosabb egyezés érhető el, amennyiben a mintában kialakuló fűtési effektusokat is figyelembe vesszük elektron—fonon csatolás segítségével. Megvizsgáltam a háromterminálos Josephson-átmenet kapcsolási áram-eloszlásának viselkedését. Ennek segítségével megmutattam, hogy a minta kapcsolási dinamikáját a fázisdiffúzió folyamata határozza meg, amennyiben a teljes minta szupravezető állapotban van. Továbbá, megmutattam, hogy amennyiben a mintában szupra- és normál áramok egyaránt jelen vannak, a kapcsolási dinamika megváltozik és a megemelkedett hőmérséklet hatására a kapcsolat csillapítása megnövekedik. [T5]

Publikációs lista

- T1 Simon Zihlmann, Aron W. Cummings, José H. Garcia, Máté Kedves, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Christian Schönenberger, and Péter Makk, Large spin relaxation anisotropy and valley-Zeeman spin-orbit coupling in WSe₂/Gr/hBN heterostructures, *Phys. Rev. B* 97, 075434 (2018)
- T2 Bálint Fülöp, Albin Márffy, Endre Tóvári, Máté Kedves, Simon Zihlmann, David Indolese, Zoltán Kovács-Krausz, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Christian Schönenberger, István Kézsmárki, Péter Makk, and Szabolcs Csonka. New method of transport measurements on van der Waals heterostructures under pressure, *J. Appl. Phys.* 130(6):064303 (2021)
- T3 Máté Kedves, Bálint Szentpéteri, Albin Márffy, Endre Tóvári, Nikos Papadopoulos, Prasanna K. Rout, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Srijit Goswami, Szabolcs Csonka, and Péter Makk, Stabilizing the inverted phase of a WSe₂/BLG/WSe₂ heterostructure via hydrostatic pressure, *Nano Letters* 23 (20), 9508-9514 (2023)
- T4 Máté Kedves, Prasanna K. Rout, Nikos Papadopoulos, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Szabolcs Csonka, Srijit Goswami, Péter Makk, Current-phase relation measurements of WSe₂/graphene heterostructures, *manuscript under preparation*
- T5 Máté Kedves, Tamás Pápai, Gergő Fülöp, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Péter Makk, and Szabolcs Csonka, Self-heating effects and switching dynamics in graphene multiterminal Josephson junctions, *Phys. Rev. Research* 6, 033143 (2024)

Tézispontokhoz nem kötött publikációk

- T6 Simon Zihlmann, Péter Makk, Mirko K. Rehmann, Lujun Wang, Máté Kedves, David Indolese, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Dominik M. Zumbühl, and Christian Schönenberger, Out-of-plane corrugations in graphene based van der Waals heterostructures, *Phys. Rev. B* 102, 195404 (2020)
- T7 Bálint Fülöp, Albin Márffy, Simon Zihlmann, Martin Gmitra, Endre Tóvári, Bálint Szentpéteri, Máté Kedves, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Jaroslav Fabian, Christian Schönenberger, Péter Makk, Szabolcs Csonka, Boosting proximity spin orbit coupling in graphene/WSe₂ heterostructures via hydrostatic pressure, *npj 2D Mater Appl* 5, 82 (2021)
- T8 Tosson Elalaily, Martin Berke, Máté Kedves, Gergő Fülöp, Zoltán Scherübl, Thomas Kanne, Jesper Nygård, Péter Makk, and Szabolcs Csonka, Signatures of gate-driven out of equilibrium superconductivity in Ta/InAs nanowires, *ACS Nano* 17, 6, 5528–5535 (2023)
- T9 Bálint Szentpéteri, Albin Márffy, Máté Kedves, Endre Tóvári, Bálint Fülöp, István Küke-mezey, András Magyarkuti, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Szabolcs Csonka, Péter Makk, Tuning the proximity induced spin-orbit coupling in bilayer graphene/WSe₂ heterostructures with pressure, arXiv:2409.20062, submitted to *Phys. Rev. B*

Hivatkozások

- [1] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8):114–117, 1965.
- [2] M. Mitchell Waldrop. The chips are down for moore’s law. *Nature*, 530(7589): 144–147, February 2016. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/530144a.
- [3] Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph C. Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, Sergio Boixo, Fernando G. S. L. Brandao, David A. Buell, Brian Burkett, Yu Chen, Zijun Chen, Ben Chiaro, Roberto Collins, William Courtney, Andrew Dunsworth, Edward Farhi, Brooks Foxen, Austin Fowler, Craig Gidney, Marissa Giustina, Rob Graff, Keith Guerin, Steve Habegger, Matthew P. Harrigan, Michael J. Hartmann, Alan Ho, Markus Hoffmann, Trent Huang, Travis S. Humble, Sergei V. Isakov, Evan Jeffrey, Zhang Jiang, Dvir Kafri, Kostyantyn Kechedzhi, Julian Kelly, Paul V. Klimov, Sergey Knysh, Alexander Korotkov, Fedor Kostritsa, David Landhuis, Mike Lindmark, Erik Lucero, Dmitry Lyakh, Salvatore Mandrà, Jarrod R. McClean, Matthew McEwen, Anthony Megrant, Xiao Mi, Kristel Michielsen, Masoud Mohseni, Josh Mutus, Ofer Naaman, Matthew Neeley, Charles Neill, Murphy Yuezhen Niu, Eric Ostby, Andre Petukhov, John C. Platt, Chris Quintana, Eleanor G. Rieffel, Pedram Roushan, Nicholas C. Rubin, Daniel Sank, Kevin J. Satzinger, Vadim Smelyanskiy, Kevin J. Sung, Matthew D. Trevithick, Amit Vainsencher, Benjamin Villalonga, Theodore White, Z. Jamie Yao, Ping Yeh, Adam Zalcman, Hartmut Neven, and John M. Martinis. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779):505–510, October 2019. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/s41586-019-1666-5.
- [4] Dongxin Gao, Daojin Fan, Chen Zha, Jiahao Bei, Guoqing Cai, Jianbin Cai, Sirui Cao, Fusheng Chen, Jiang Chen, Kefu Chen, Xiawei Chen, Xiqing Chen, Zhe Chen, Zhiyuan Chen, Zihua Chen, Wenhao Chu, Hui Deng, Zhibin Deng, Pei Ding, Xun Ding, Zhuzhengqi Ding, Shuai Dong, Yupeng Dong, Bo Fan, Yuanhao Fu, Song Gao, Lei Ge, Ming Gong, Jiacheng Gui, Cheng Guo, Shaojun Guo, Xiaoyang Guo, Lianchen Han, Tan He, Linyin Hong, Yisen Hu, He-Liang Huang, Yong-Heng Huo, Tao Jiang, Zuokai Jiang, Honghong Jin, Yunxiang Leng, Dayu Li, Dongdong Li, Fangyu Li, Jiaqi Li, Jinjin Li, Junyan Li, Junyun Li, Na Li, Shaowei Li, Wei Li, Yuhuai Li, Yuan Li, Futian Liang, Xuelian Liang, Nanxing Liao, Jin Lin, Weiping Lin, Dailin Liu, Hongxiu Liu, Maliang Liu, Xinyu Liu, Xuemeng Liu, Yancheng Liu, Haoxin Lou, Yuwei Ma, Lingxin Meng, Hao Mou, Kailiang Nan, Binghan Nie, Meijuan Nie, Jie Ning, Le Niu, Wenyi Peng, Haoran Qian, Hao Rong, Tao Rong, Huiyan Shen, Qiong Shen, Hong Su, Feifan Su, Chenyin Sun, Liangchao Sun, Tianzuo Sun, Yingxiu Sun, Yimeng Tan, Jun Tan, Longyue Tang, Wenbing Tu, Cai Wan, Jiafei Wang, Biaowang, Chang Wang, Chen Wang, Chu Wang, Jian Wang, Liangyuan Wang, Rui

- Wang, Shengtao Wang, Xiaomin Wang, Xinzhe Wang, Xunxun Wang, Yeru Wang, Zuolin Wei, Jiazhou Wei, Dachao Wu, Gang Wu, Jin Wu, Shengjie Wu, Yulin Wu, Shiyong Xie, Lianjie Xin, Yu Xu, Chun Xue, Kai Yan, Weifeng Yang, Xinpeng Yang, Yang Yang, Yangsen Ye, Zhenping Ye, Chong Ying, Jiale Yu, Qinjing Yu, Wenhui Yu, Xiangdong Zeng, Shaoyu Zhan, Feifei Zhang, Haibin Zhang, Kaili Zhang, Pan Zhang, Wen Zhang, Yiming Zhang, Yongzhuo Zhang, Lixiang Zhang, Guming Zhao, Peng Zhao, Xianhe Zhao, Xintao Zhao, Youwei Zhao, Zhong Zhao, Luyuan Zheng, Fei Zhou, Liang Zhou, Na Zhou, Naibin Zhou, Shifeng Zhou, Shuang Zhou, Zhengxiao Zhou, Chengjun Zhu, Qingling Zhu, Guihong Zou, Haonan Zou, Qiang Zhang, Chao-Yang Lu, Cheng-Zhi Peng, Xiaobo Zhu, and Jian-Wei Pan. Establishing a new benchmark in quantum computational advantage with 105-qubit zuhongzhi 3.0 processor. *Physical Review Letters*, 134(9):090601, March 2025. ISSN 1079-7114. doi: 10.1103/physrevlett.134.090601.
- [5] Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, Ming-Cheng Chen, Li-Chao Peng, Yi-Han Luo, Jian Qin, Dian Wu, Xing Ding, Yi Hu, Peng Hu, Xiao-Yan Yang, Wei-Jun Zhang, Hao Li, Yuxuan Li, Xiao Jiang, Lin Gan, Guangwen Yang, Lixing You, Zhen Wang, Li Li, Nai-Le Liu, Chao-Yang Lu, and Jian-Wei Pan. Quantum computational advantage using photons. *Science*, 370(6523):1460–1463, December 2020. ISSN 1095-9203. doi: 10.1126/science.abe8770.
- [6] A Yu Kitaev. Unpaired majorana fermions in quantum wires. *Physics-Uspekhi*, 44(10S):131–136, October 2001. ISSN 1468-4780. doi: 10.1070/1063-7869/44/10s/s29.
- [7] Liang Fu and C. L. Kane. Superconducting proximity effect and majorana fermions at the surface of a topological insulator. *Physical Review Letters*, 100(9):096407, March 2008. ISSN 1079-7114. doi: 10.1103/physrevlett.100.096407.
- [8] 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, August 2010. ISSN 1079-7114. doi: 10.1103/physrevlett.105.077001.
- [9] A.Yu. Kitaev. Fault-tolerant quantum computation by anyons. *Annals of Physics*, 303(1):2–30, January 2003. ISSN 0003-4916. doi: 10.1016/s0003-4916(02)00018-0.
- [10] C. L. Kane and E. J. Mele. Quantum spin hall effect in graphene. *Physical Review Letters*, 95(22):226801, nov 2005. doi: 10.1103/physrevlett.95.226801.
- [11] M. Gmitra, S. Konschuh, C. Ertler, C. Ambrosch-Draxl, and J. Fabian. Band-structure topologies of graphene: Spin-orbit coupling effects from first principles. *Physical Review B*, 80(23), dec 2009. doi: 10.1103/physrevb.80.235431.
- [12] Zhe Wang, Dong-Keun Ki, Hua Chen, Helmut Berger, Allan H. MacDonald, and Alberto F. Morpurgo. Strong interface-induced spin-orbit interaction in graphene on WS₂. *Nature Communications*, 6(1):8339, sep 2015. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/ncomms9339. URL <https://doi.org/10.1038/ncomms9339>.
- [13] J. Ingla-Aynés, M. H. D. Guimarães, R. J. Meijerink, P. J. Zomer, and B. J. van Wees. 24 – μ m spin relaxation length in boron nitride encapsulated bilayer graphene. *Phys. Rev. B*, 92:201410, Nov 2015. doi: 10.1103/PhysRevB.92.201410. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.201410>.

- [14] Marc Drögeler, Christopher Franzen, Frank Volmer, Tobias Pohlmann, Luca Banszerus, Maik Wolter, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Christoph Stampfer, and Bernd Beschoten. Spin lifetimes exceeding 12 ns in graphene nonlocal spin valve devices. *Nano Letters*, 16(6):3533–3539, may 2016. doi: 10.1021/acs.nanolett.6b00497.
- [15] Simranjeet Singh, Jyoti Katoch, Jinsong Xu, Cheng Tan, Tiancong Zhu, Walid Amamou, James Hone, and Roland Kawakami. Nanosecond spin relaxation times in single layer graphene spin valves with hexagonal boron nitride tunnel barriers. *Applied Physics Letters*, 109(12):122411, sep 2016. doi: 10.1063/1.4962635.
- [16] Bowen Yang, Min-Feng Tu, Jeongwoo Kim, Yong Wu, Hui Wang, Jason Alicea, Ruyuan Wu, Marc Bockrath, and Jing Shi. Tunable spin–orbit coupling and symmetry-protected edge states in graphene/ws₂. *2D Materials*, 3(3):031012, sep 2016. doi: 10.1088/2053-1583/3/3/031012.
- [17] André Dankert and Saroj P. Dash. Electrical gate control of spin current in van der waals heterostructures at room temperature. *Nature Communications*, 8(1):16093, jul 2017. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/ncomms16093. URL <https://doi.org/10.1038/ncomms16093>.
- [18] S. Omar and B. J. van Wees. Spin transport in high-mobility graphene on ws₂ substrate with electric-field tunable proximity spin-orbit interaction. *Phys. Rev. B*, 97:045414, Jan 2018. doi: 10.1103/PhysRevB.97.045414. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.97.045414>.
- [19] Wei Han, Roland K. Kawakami, Martin Gmitra, and Jaroslav Fabian. Graphene spintronics. *Nature Nanotechnology*, 9(10):794–807, October 2014. ISSN 1748-3395. doi: 10.1038/nnano.2014.214.
- [20] Martin Gmitra, Denis Kochan, Petra Högl, and Jaroslav Fabian. Trivial and inverted dirac bands and the emergence of quantum spin hall states in graphene on transition-metal dichalcogenides. *Physical Review B*, 93(15):155104, April 2016. ISSN 2469-9969. doi: 10.1103/physrevb.93.155104.
- [21] Michael P. Zaletel and Jun Yong Khoo. The gate-tunable strong and fragile topology of multilayer-graphene on a transition metal dichalcogenide. *arXiv (Condensed Matter, Mesoscale and Nanoscale Physics)*, January 2019. doi: 10.48550/ARXIV.1901.01294. January 9, 2019, <https://arxiv.org/abs/1901.01294> (accessed 2023-09-01).
- [22] Fernando Peñaranda, Ramón Aguado, Elsa Prada, and Pablo San-Jose. Majorana bound states in encapsulated bilayer graphene. *SciPost Phys.*, 14:075, 2023. doi: 10.21468/SciPostPhys.14.4.075. URL <https://scipost.org/10.21468/SciPostPhys.14.4.075>.
- [23] J O Island, X Cui, C Lewandowski, J Y Khoo, E M Spanton, H Zhou, D Rhodes, J C Hone, T Taniguchi, K Watanabe, L S Levitov, M P Zaletel, and A F Young. Spinorbit-driven band inversion in bilayer graphene by the van der waals proximity effect. *Nature*, 571:85–89, 6 2019. doi: 10.1038/s41586-019-1304-2.

- [24] Prasanna Rout, Nikos Papadopoulos, Fernando Peñaranda, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Elsa Prada, Pablo San-Jose, and Srijit Goswami. Supercurrent mediated by helical edge modes in bilayer graphene. *Nature Communications*, 15(1), January 2024. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-024-44952-6.
- [25] Jiang-Xiazi Lin, Ya-Hui Zhang, Erin Morissette, Zhi Wang, Song Liu, Daniel Rhodes, K Watanabe, T Taniguchi, James Hone, and J I A Li. Spin-orbitdriven ferromagnetism at half moiré filling in magic-angle twisted bilayer graphene. *Science*, 375 (6579):437–441, 1 2022. ISSN 1095-9203. doi: 10.1126/science.abh2889.
- [26] Saisab Bhowmik, Bhaskar Ghawri, Youngju Park, Dongkyu Lee, Suvronil Datta, Radhika Soni, K. Watanabe, T. Taniguchi, Arindam Ghosh, Jeil Jung, and U. Chandni. Spin-orbit coupling-enhanced valley ordering of malleable bands in twisted bilayer graphene on wse2. *Nature Communications*, 14(1), July 2023. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-023-39855-x.
- [27] Yang-Zhi Chou, Yuting Tan, Fengcheng Wu, and Sankar Das Sarma. Topological flat bands, valley polarization, and interband superconductivity in magic-angle twisted bilayer graphene with proximitized spin-orbit couplings. *Physical Review B*, 110(4): 1041108, July 2024. ISSN 2469-9969. doi: 10.1103/physrevb.110.1041108.
- [28] Sergej Konschuh, Martin Gmitra, Denis Kochan, and Jaroslav Fabian. Theory of spin-orbit coupling in bilayer graphene. *Phys. Rev. B* 85, 115423 (2012), 85:115423, 11 2012. doi: 10.1103/PhysRevB.85.115423. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.85.115423>.
- [29] Martin Gmitra and Jaroslav Fabian. Graphene on transition-metal dichalcogenides: A platform for proximity spin-orbit physics and optospintronics. *Phys. Rev. B*, 92:155403, Oct 2015. doi: 10.1103/PhysRevB.92.155403. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.92.155403>.
- [30] Jose H. Garcia, Marc Vila, Aron W. Cummings, and Stephan Roche. Spin transport in graphene/transition metal dichalcogenide heterostructures. *Chemical Society Reviews*, 47(9):3359–3379, 2018. doi: 10.1039/c7cs00864c.
- [31] A. Avsar, J. Y. Tan, T. Taychatanapat, J. Balakrishnan, G.K.W. Koon, Y. Yeo, J. Lahiri, A. Carvalho, A. S. Rodin, E.C.T. O’Farrell, G. Eda, A. H. Castro Neto, and B. Özyilmaz. Spin-orbit proximity effect in graphene. *Nature Communications*, 5(1):4875, sep 2014. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/ncomms5875. URL <https://doi.org/10.1038/ncomms5875>.
- [32] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim. The electronic properties of graphene. *Reviews of Modern Physics*, 81(1):109–162, January 2009. ISSN 1539-0756. doi: 10.1103/revmodphys.81.109.
- [33] Conan Weeks, Jun Hu, Jason Alicea, Marcel Franz, and Ruqian Wu. Engineering a robust quantum spin hall state in graphene via adatom deposition. *Physical Review X*, 1(2):021001, October 2011. ISSN 2160-3308. doi: 10.1103/physrevx.1.021001.
- [34] Zhe Wang, Dong-Keun Ki, Jun Yong Khoo, Diego Mauro, Helmuth Berger, Leonid S. Levitov, and Alberto F. Morpurgo. Origin and magnitude of ‘designer’ spin-orbit interaction in graphene on semiconducting transition metal dichalcogenides.

Physical Review X, 6(4):041020, October 2016. ISSN 2160-3308. doi: 10.1103/physrevx.6.041020.

- [35] Simon Zihlmann, Aron W. Cummings, Jose H. Garcia, Máté Kedves, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Christian Schönenberger, and Péter Makk. Large spin relaxation anisotropy and valley-zeeman spin-orbit coupling in wse_2 /graphene/ h -bn heterostructures. *Phys. Rev. B*, 97:075434, Feb 2018. doi: 10.1103/PhysRevB.97.075434. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.97.075434>.
- [36] 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*, 2(10):575–594, September 2020. ISSN 2522-5820. doi: 10.1038/s42254-020-0228-y.
- [37] Asbjørn Rasmussen, Jeroen Danon, Henri Suominen, Fabrizio Nichele, Morten Kjaergaard, and Karsten Flensberg. Effects of spin-orbit coupling and spatial symmetries on the josephson current in sns junctions. *Physical Review B*, 93(15):155406, April 2016. ISSN 2469-9969. doi: 10.1103/physrevb.93.155406.
- [38] D. B. Szombati, S. Nadj-Perge, D. Car, S. R. Plissard, E. P. A. M. Bakkers, and L. P. Kouwenhoven. Josephson 0-junction in nanowire quantum dots. *Nature Physics*, 12(6):568–572, May 2016. ISSN 1745-2481. doi: 10.1038/nphys3742.
- [39] Alexandre Assouline, Cheryl Feuillet-Palma, Nicolas Bergeal, Tianzhen Zhang, Alireza Mottaghizadeh, Alexandre Zimmers, Emmanuel Lhuillier, Mahmoud Eddrie, Paola Atkinson, Marco Aprili, and Hervé Aubin. Spin-orbit induced phase-shift in bi_2se_3 josephson junctions. *Nature Communications*, 10(1), January 2019. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-018-08022-y.
- [40] S. Reinhardt, T. Ascherl, A. Costa, J. Berger, S. Gronin, G. C. Gardner, T. Lindemann, M. J. Manfra, J. Fabian, D. Kochan, C. Strunk, and N. Paradiso. Link between supercurrent diode and anomalous josephson effect revealed by gate-controlled interferometry. *Nature Communications*, 15(1), May 2024. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-024-48741-z.
- [41] Muhammad Nadeem, Michael S. Fuhrer, and Xiaolin Wang. The superconducting diode effect. *Nature Reviews Physics*, 5(10):558–577, September 2023. ISSN 2522-5820. doi: 10.1038/s42254-023-00632-w.
- [42] Christian Baumgartner, Lorenz Fuchs, Andreas Costa, Simon Reinhardt, Sergei Gronin, Geoffrey C. Gardner, Tyler Lindemann, Michael J. Manfra, Paulo E. Faria Junior, Denis Kochan, Jaroslav Fabian, Nicola Paradiso, and Christoph Strunk. Supercurrent rectification and magnetochiral effects in symmetric josephson junctions. *Nature Nanotechnology*, 17(1):39–44, November 2021. ISSN 1748-3395. doi: 10.1038/s41565-021-01009-9.
- [43] Kun-Rok Jeon, Jae-Keun Kim, Jiho Yoon, Jae-Chun Jeon, Hyeon Han, Audrey Cottet, Takis Kontos, and Stuart S. P. Parkin. Zero-field polarity-reversible josephson supercurrent diodes enabled by a proximity-magnetized pt barrier. *Nature Materials*, 21(9):1008–1013, July 2022. ISSN 1476-4660. doi: 10.1038/s41563-022-01300-7.

- [44] Heng Wu, Yaojia Wang, Yuanfeng Xu, Pranava K. Sivakumar, Chris Pasco, Ulderico Filippozzi, Stuart S. P. Parkin, Yu-Jia Zeng, Tyrel McQueen, and Mazhar N. Ali. The field-free josephson diode in a van der waals heterostructure. *Nature*, 604(7907): 653–656, April 2022. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/s41586-022-04504-8.
- [45] Lorenz Bauriedl, Christian Bäuml, Lorenz Fuchs, Christian Baumgartner, Nicolas Paulik, Jonas M. Bauer, Kai-Qiang Lin, John M. Lupton, Takashi Taniguchi, Kenji Watanabe, Christoph Strunk, and Nicola Paradiso. Supercurrent diode effect and magnetochiral anisotropy in few-layer nbse2. *Nature Communications*, 13(1), July 2022. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-022-31954-5.
- [46] Banabir Pal, Anirban Chakraborty, Pranava K. Sivakumar, Margarita Davydova, Ajesh K. Gopi, Avanindra K. Pandeya, Jonas A. Krieger, Yang Zhang, Mihir Date, Sailong Ju, Noah Yuan, Niels B. M. Schröter, Liang Fu, and Stuart S. P. Parkin. Josephson diode effect from cooper pair momentum in a topological semimetal. *Nature Physics*, 18(10):1228–1233, August 2022. ISSN 1745-2481. doi: 10.1038/s41567-022-01699-5.
- [47] J. Díez-Mérida, A. Díez-Carlón, S. Y. Yang, Y.-M. Xie, X.-J. Gao, J. Senior, K. Watanabe, T. Taniguchi, X. Lu, A. P. Higginbotham, K. T. Law, and Dmitri K. Efetov. Symmetry-broken josephson junctions and superconducting diodes in magic-angle twisted bilayer graphene. *Nature Communications*, 14(1), April 2023. ISSN 2041-1723. doi: 10.1038/s41467-023-38005-7.
- [48] Bianca Turini, Sedighe Salimian, Matteo Carrega, Andrea Iorio, Elia Strambini, Francesco Giazotto, Valentina Zannier, Lucia Sorba, and Stefan Heun. Josephson diode effect in high-mobility insb nanoflags. *Nano Letters*, 22(21):8502–8508, October 2022. ISSN 1530-6992. doi: 10.1021/acs.nanolett.2c02899.
- [49] Roman-Pascal Riwar, Manuel Houzet, Julia S. Meyer, and Yuli V. Nazarov. Multi-terminal Josephson junctions as topological matter. *Nature Communications*, 7(1), apr 2016. doi: 10.1038/ncomms11167.