

Порівняльний аналіз ефекту слабкої анти-локалізації у ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ та споріднених топологічних структурах

Національний університет «Львівська політехніка»

У цій роботі представлено детальний порівняльний огляд і аналіз проявів ефекту слабкої анти-локалізації (WAL) у ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ у зіставленні з відомими результатами для монокристалів і тонких плівок Bi_2Se_3 , що традиційно розглядаються як модельні системи для досліджень топологічних ізоляторів. В огляді висвітлено вплив морфології зразків, природи легуючих домішок, рівня структурного безладу та ефектів сильної спин-орбітальної взаємодії на параметри когерентного квантового транспорту. Особлива увага приділена аналізу унікального поєднання ниткоподібної форми кристалів, легування паладієм та виявленої залишкової поверхневої надпровідності, що робить такі структури перспективними для фундаментальних і прикладних досліджень у сфері топологічних матеріалів. Для зіставлення обрано три ключові роботи: одна присвячена дослідженню WAL у Pd-легованих монокристалах Bi_2Se_3 , вирощених методом зонального плавлення, інша демонструє результати комплексного аналізу WAL та Шубніков–де-Гаасівських (SdH) осциляцій у плівках Bi_2Se_3 без додаткового легування, а третя робота описує WAL та SdH-осциляції у чистих монокристалах Bi_2Se_3 . Порівняльний аналіз показує, що довжина фазової когерентності у ниткоподібних кристалах дещо менша, ніж у монокристалах та плівках, однак унікальне поєднання морфології й легування створює умови для поєднання WAL з залишковою надпровідністю, що не було зафіксовано у раніше відомих системах Bi_2Se_3 . Водночас, у наших зразках виявлено слабку нематичну анізотропію, що проявляється у зміні напрямної симетрії критичного магнітного поля. Таке поєднання особливостей відкриває перспективи для дослідження взаємодії поверхневих станів з надпровідною фазою, що є актуальним для розробки квантових пристроїв і спинтронних компонентів нового покоління. Отримані результати доповнюють сучасні уявлення про керування топологічними станами матеріалів через контроль морфології, хімічного складу та умов вирощування. Представлені дані можуть бути використані для подальших експериментів, спрямованих на оптимізацію параметрів наноструктурованих надпровідників на основі Bi_2Se_3 .

Ключові слова: Bi_2Se_3 , ниткоподібні кристали, слабка анти-локалізація, спин-орбітальна взаємодія, Pd-легування, залишкова надпровідність, нематичність, магнітотранспорт

1. Вступ і постановка проблеми

Топологічні ізолятори на основі Bi_2Se_3 привертають значну увагу завдяки наявності топологічно захищених поверхневих станів зі спин-орбітальним зв'язком, що призводить до унікальних квантових ефектів у перенесенні заряду. Одним із найбільш характерних проявів цих станів є ефект слабкої анти-локалізації (WAL) — квантово-інтерференційне явище, що проявляється як зростання провідності при слабких магнітних полях і низьких температурах.

Метою цієї роботи є порівняння власних результатів спостереження ефекту слабкої анти-локалізації у ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ з результатами інших досліджень, проведених для монокристалів і тонких плівок Bi_2Se_3 . Такий порівняльний аналіз дозволяє виявити спільні риси та відмінності, зокрема щодо впливу легування паладієм, морфології зразків та супутніх явищ, таких як залишкова надпровідність і нематичність, на особливості WAL та

квантового транспорту.

2. Огляд літератури

WAL спостерігається не лише в Bi_2Se_3 , але і в інших топологічних матеріалах, таких як напівметал Вейля [1] $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ [2], TaAs [3] чи топологічних ізоляторах SnTe чи GeTe [4, 5], що демонструє універсальний характер цього ефекту для систем з сильним спин-орбітальним зв'язком. Проте саме Bi_2Se_3 є одним із найкраще досліджених матеріалів завдяки простій хімічній формулі, широкій забороненій зоні та високій якості вирощуваних кристалів.

Ефект WAL у Bi_2Se_3 детально досліджувався на різних наноструктурах та тонких плівках. В роботі [6] продемонстровано WAL у розпилених тонких плівках Bi_2Se_3 із регульованою товщиною, показавши, що амплітуда WAL та довжина фазової когерентності сильно залежать від товщини, підкреслюючи взаємодію між 2D поверхневими та 3D об'ємними станами. В роботі [7] автори узагальнили дані про стабільний прояв WAL у плівках Bi_2Se_3 та підкреслили його чутливість до якості кристалу, концентрації дефектів і розмірного ефекту.

Різні типи легування використовувались для керування WAL та пов'язаними квантовими транспортними ефектами. В роботах [8] та [9] автори зосередили увагу на легуванні Bi_2Se_3 атомами Fe, показавши, що магнітні домішки можуть поступово пригнічувати WAL та спричиняти перехід до слабкої локалізації (WL) через порушення симетрії часу. Автори роботи [10] показали, що у Dy-легованих нанопластинах Bi_2Se_3 слабка анти-локалізація конкурує з перенесенням заряду через локалізовані стани та парамагнетизмом, що свідчить про суттєвий вплив безладу і магнітного розсіяння.

Перехід WAL–WL також спостерігається у дослідженнях із легуванням Cr. В роботі [11] автори дослідили тонкі плівки Bi_2Se_3 , леговані Cr, показавши, що зі збільшенням вмісту Cr квантова інтерференція поступово змищується від WAL до WL, що проявляється у зміні знаку параметра α у моделі Хікамі–Ларкіна–Наґаоки (HLN) [12]. Такі результати підкреслюють, що магнітне легування діє як регулятор квантової когерентності топологічних станів.

Ефекти близькісної взаємодії створюють додаткові можливості для керування проявами WAL. В роботі [13] автори дослідили гібридні структури $\text{Bi}_2\text{Se}_3/\text{CoFeB}$ і показали, що нелінійний ефект Холла за низьких температур прямо корелює з довжиною фазової когерентності, визначеною з аналізу WAL. Це вказує на роль спин-дезорієнтованих каналів у посиленні квантового перенесення заряду й підтверджує взаємозв'язок WAL із магнітними ефектами на границі матеріалів.

Вплив текстури плівки та безладу також активно вивчався, як продемонстровано в роботі [14]. Там дослідники показали, як кристалографічна текстура впливає на WAL у колоїдних плівках Bi_2Se_3 . Вони показали, що добре впорядковані плівки зберігають потужні WAL-сигнали з великою довжиною фазової когерентності (до ~ 80 нм), тоді як посилення структурного безладу пригнічує WAL, підтверджуючи, що атомарний порядок є критично важливим для стабільного поверхневого транспорту.

Взаємодія електрон–електрон додатково збагачує фізику WAL. Автори роботи [15] надали детальний аналіз анізотропної магнітопровідності у тонких плівках Bi_2Se_3 , показавши, що стандартну модель HLN потрібно розширити поправками, що враховують електрон-електронну взаємодію, щоб повністю описати температурну та кутову залежність WAL.

У цілому, значний обсяг робіт з WAL у системах Bi_2Se_3 підкреслює:

- Домінуючу роль сильної SOC та топологічно захищених поверхневих станів.
- Велику залежність проявів WAL від безладу, легування, товщини плівки та текстури.
- Значущість WAL як чутливого індикатора фазової когерентності та квантової природи транспорту у топологічних матеріалах.

Ці результати створюють надійну основу для порівняння з нашими новими даними про WAL у ниткоподібних кристалах Bi_2Se_3 , легованих Pd, які унікально поєднують WAL, залишкову надпровідність і нематичність у єдиній наноструктурі.

3. Порівняння результатів

Ми також спостерігали ефект слабкої анти-локалізації у ниткоподібних кристалах Bi_2Se_3 і описали ці результати у роботі [18] – див. рис. 1.

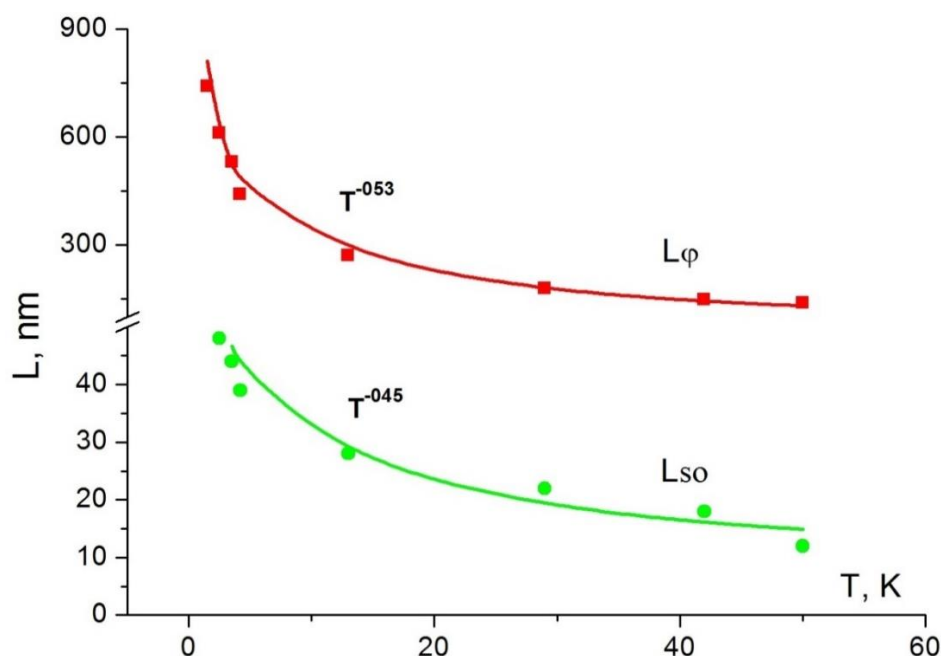


Рис. 1. [18] Температурна залежність довжини фазової когерентності L_ϕ та довжини спин-орбітальної взаємодії L_{so} для ниткоподібних кристалів Bi_2Se_3

Для глибшого розуміння ефекту слабкої анти-локалізації у ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ доцільно порівняти отримані результати з даними інших дослідників.

Робота [7] присвячена дослідженню WAL у монокристалах Bi_2Se_3 , легованих Pd та вирощених методом зонального плавлення. Автори отримали довжину фазової когерентності, яка зростає зі зменшенням температури й досягає кількох сотень нанометрів при низьких температурах (див. рис. 2). У нашому випадку для ниткоподібних кристалів $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ довжина фазової когерентності складає близько 25–40 нм при 1,5–6 К (див. рис. 1), що є меншим значенням, але при цьому спостерігається залишкова надпровідність. Це свідчить, що в наших зразках істотно впливає морфологія — об'єм кристалу

залишається малим, а поверхневі стани домінують у переносі, хоча можуть бути більш чутливі до дефектів і безладу.

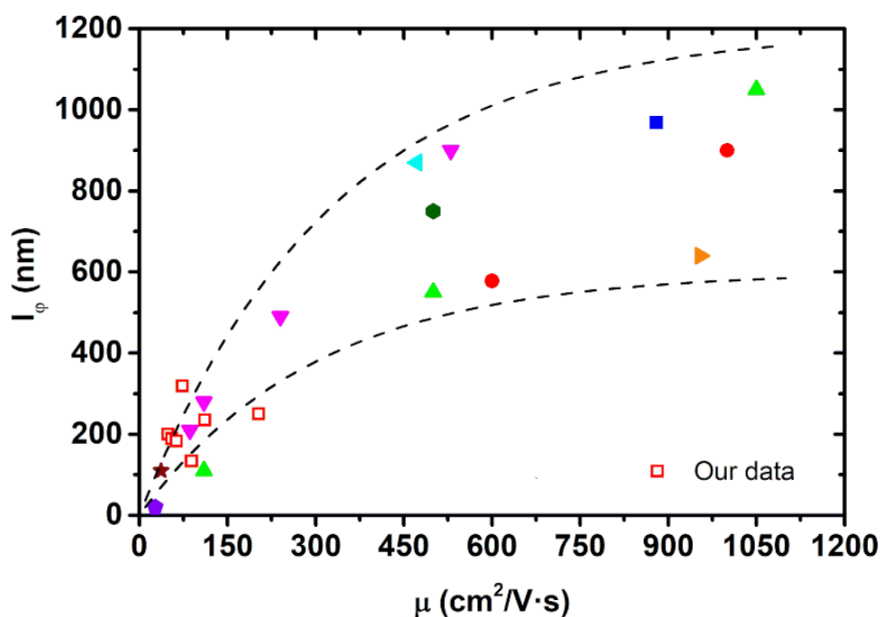


Рис. 2. [7] Графічне представлення залежності довжини фазової когерентності l_ϕ від рухливості μ для різних плівок. Пунктирні чорні лінії подані як орієнтовні напрямляючі.

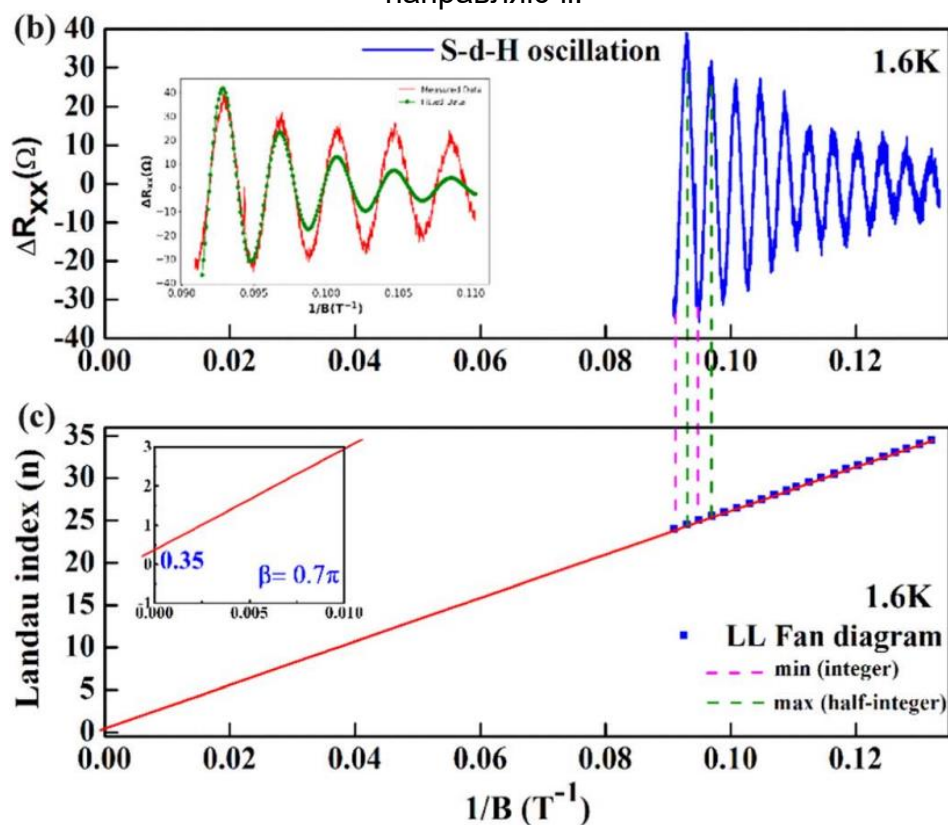


Рис. 3. [16] Діаграма рівнів Ландау, перетин якої визначає фазу Беррі (β) (див. вставку), а нахил відповідає площі поверхні Фермі та хвильовому вектору

Робота [16] детально досліджує тонкі плівки Bi_2Se_3 без додаткового легування Pd та демонструє, що навіть у багатоканальних структурах можна спостерігати чітко виражений ефект слабкої анти-локалізації разом із квантовими осциляціями Шубнікова–де-Гааса. Автори змогли визначити циклічну масу носіїв заряду та оцінити фазу Беррі, яка виявилася близькою до π (див. рис. 3). Це вказує на домінування топологічних поверхневих станів у перенесенні заряду, незважаючи на внесок об'ємних носіїв, який неминучий у плівках такої товщини. Такий підхід із паралельним використанням WAL і SdH дозволив авторам [16] підтвердити топологічну природу станів через незалежні експериментальні ознаки, що є важливим доповненням до стандартного аналізу магнітопровідності. На відміну від цього підходу, у наших ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ спостереження WAL поєднуються із зниженням опору нижче 4,2 K, що інтерпретується як прояв залишкової поверхневої надпровідності. Це означає, що навіть за меншої довжини фазової когерентності, порівняно з тонкими плівками, специфічна морфологія ниткоподібних кристалів і Pd-легування сприяють виникненню надпровідної компоненти, зберігаючи при цьому ознаки когерентних топологічних станів. Зокрема, у наших зразках не спостерігались SdH-осциляції, оскільки вони часто пригнічуються залишковою надпровідністю або сильнішими флуктуаціями у вузьких структурах з високим відношенням поверхні до об'єму.

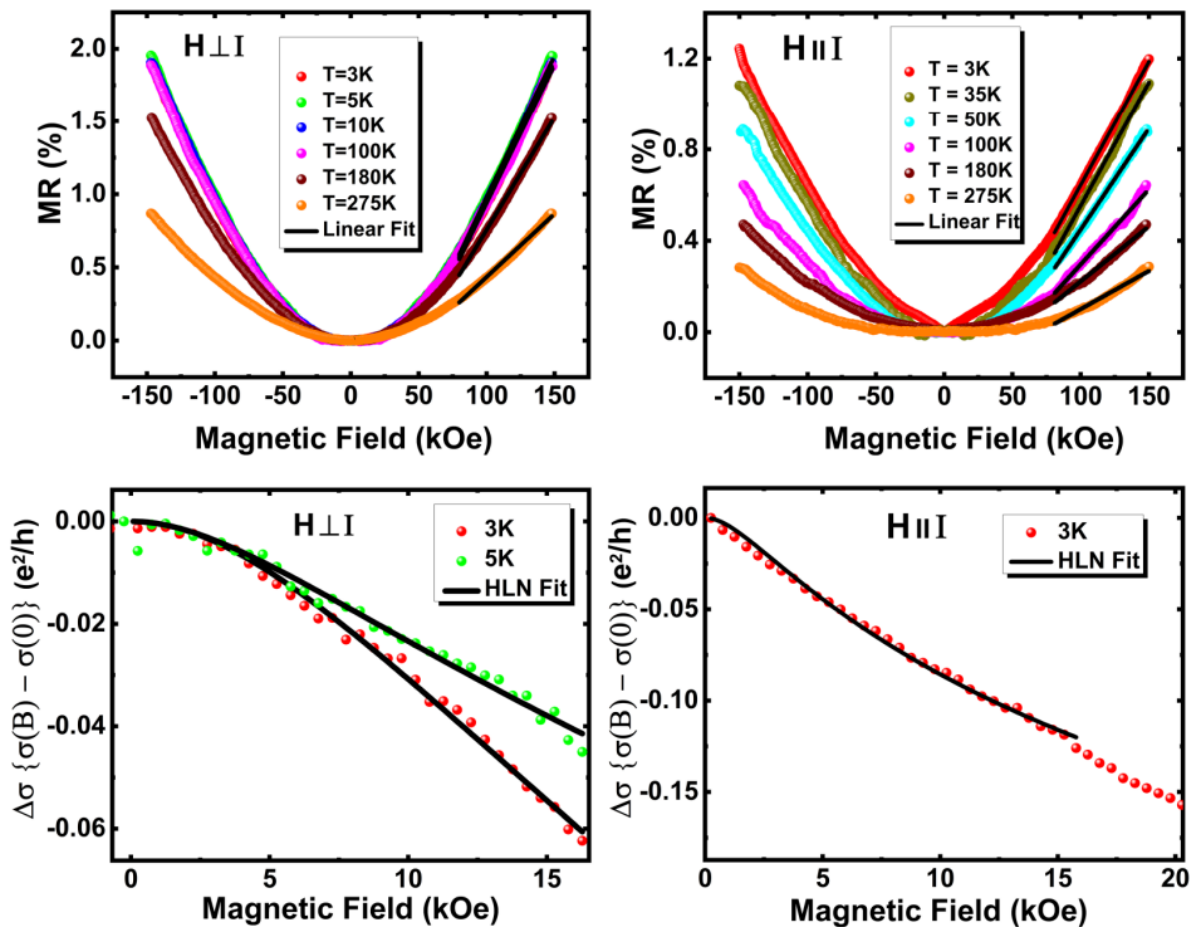


Рис. 4. [17] Магнетоопір: (а) поперечна конфігурація та (б) повздовжня конфігурація, виміряний за різних температур

Робота [17] описує комплексне дослідження магнітотранспортних властивостей і термоелектричних характеристик чистих монокристалів Bi_2Se_3 . Автори підтвердили ефект слабкої анти-локалізації через характерну «V»-подібну залежність магнітопровідності при низьких температурах і низьких магнітних полях (див. рис. 4). Методом апроксимації отриманих даних за моделлю Хікамі–Ларкіна–Наґаоки, отримане значення параметра α близьке до -0.5 підтверджує домінування топологічних поверхневих станів. Додатково вони спостерігали осциляції Шубнікова–де-Гааса, що дозволило визначити фазу Беррі і параметри Фермі-поверхні. Це узгоджується з наявністю масивних Діраківських ферміонів на поверхні. Також було досліджено магнітну сприйнятливості та Раман-спектри для перевірки кристалічної якості і анізотропії.

На відміну від цих монокристалів, у наших ниткоподібних кристалах $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ми фіксуємо одночасно WAL і залишкову поверхневу надпровідність нижче 4,2 K, чого не спостерігалось у [17]. Це підкреслює значення морфології ниткоподібних кристалів і Pd-легування, які забезпечують поєднання топологічних станів і надпровідної фази, що розширює можливості для дослідження квазідвовимірних топологічних надпровідників.

Висновки

Отже, у порівнянні з відомими результатами наші дослідження вперше демонструють можливість поєднання ефекту слабкої анти-локалізації (WAL), залишкової надпровідності та проявів нематичної анізотропії у межах однієї ниткоподібної структури $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$. Це відкриває перспективи для подальшого комплексного вивчення квазідвовимірних топологічних надпровідників, зокрема для виявлення взаємозв'язку між топологічними поверхневими станами, спин-орбітальною взаємодією та спонтанним порушенням симетрії у надпровідному стані. Отримані результати можуть стати підґрунтям для розробки нових гібридних пристроїв і наноструктур з керованими квантовими властивостями, зокрема у спінтроніці, квантовій обчислювальній техніці та створенні штучних матеріалів із заданими топологічними фазами. Подальші експериментальні та теоретичні дослідження у цьому напрямку дозволять глибше зрозуміти механізми взаємодії поверхневих станів із надпровідною фазою та оптимізувати умови синтезу і керування морфологією подібних структур. Таким чином, робота робить внесок у розвиток сучасної фізики топологічних матеріалів і підтверджує важливість систематичного порівняння різних морфологічних форм Bi_2Se_3 для пошуку нових квантових ефектів та їх практичного застосування.

References

1. Yan, Binghai. Topological materials: Weyl semimetals. / Claudia Felser. // Annual Review of Condensed Matter Physics. – 2017. – 8(1). - 337-354. - <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031016-025458>
2. Kumar, K. 2023. Weak antilocalization and ferromagnetism in magnetic Weyl semimetal $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ / Sharma, M.M. and Awana // Journal of Applied Physics. – 2023. - 133(2). - <https://doi.org/10.1063/5.0124644>
3. Leahy, I. A. Anisotropic weak antilocalization in thin films of the Weyl semimetal TaAs. / Rice, A. D., Jiang, C. S., Paul, G., Alberi, K., and Nelson, J. N. // Physical Review B. – 2024. - 110(5), 054206. - <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.110.054206>

4. de Castro. Weak antilocalization effect and multi-channel transport in SnTe quantum well. / S., Kawata, B., Lopes, G. R. F., Rappl, P. D. O., Abramof, E. and Peres, M. L. // Applied Physics Letters. – 2022. – 120(20). – <https://doi.org/10.1063/5.0088499>
5. Khaliq A. Low Temperature Weak Anti-Localization Effect in the GeTe and SnTe Epitaxial Layers. / Dziawa, P., Minikaev, R., Arciszewska, M., Avdonin, A., Brodowska, B., and Kilański, L. // Acta Physica Polonica. – 2022. – 5. – 657 – 657 – <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.142.657>
6. Gopal, R. K. 2D weak anti-localization in thin films of the topological semimetal Pd₃Bi₂S₂. / Shama, Goutam Sheet, and Yogesh Singh // Scientific Reports. – 2021. – 1 (11): 12618. – <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91930-9>
7. Gracia-Abad R. Omnipresence of weak antilocalization (WAL) in Bi₂Se₃ thin films: a review on its origin. / Sangiao, S., Bigi, C., Kumar Chaluvadi, S., Orgiani, P., and De Teresa, J. M. // Nanomaterials. – 2021. – 11(5). – 1077 – <https://doi.org/10.3390/nano11051077>
8. Kander, N. The effect of Fe-doping on structural, elemental, magnetic, and weak anti-localization properties of Bi₂Se₃ topological insulator. / S. Islam, S., Guchhait, S. And Das, A. K. // Applied Physics A. – 2023. – 129(4), 253 – <https://doi.org/10.1007/s00339-023-06524-1>
9. Cha J. J. Effects of magnetic doping on weak antilocalization in narrow Bi₂Se₃ nanoribbons. / Claassen, M., Kong, D., Hong, S. S., Koski, K. J., Qi, X. L. and Cui, Y. // Nano letters. – 2012. – 12(8), 4355-4359. – <https://doi.org/10.1021/nl3021472>
10. Gupta A. Paramagnetism, hopping conduction, and weak localization in highly disordered pure and Dy-doped Bi₂Se₃ nanoplates. / Srivastava, S. K. // Journal of Applied Physics. – 2020. – 127(24). – <https://doi.org/10.1063/1.5140412>
11. Gautam S. Competitive nature of weak anti-localization and weak localization effect in Cr-doped sputtered topological insulator Bi₂Se₃ thin film. / Maurya, V. K., Aggarwal, V., Kumar, R., Singh, B., Awana, V. P. S., ... and Kushvaha, S. // Journal of Applied Physics. – 2024. – 135(19). – <https://doi.org/10.1063/5.0206345>
12. Hikami S. Spin-orbit interaction and magnetoresistance in the two dimensional random system. / Larkin, A. I. and Nagaoka, Y. // Prog. Theor. Phys. – 1980. – 63. – 707–710. – <https://doi.org/10.1143/PTP.63.707>
13. Mathimalar S. Signature of gate-controlled magnetism and localization effects at Bi₂Se₃/EuS interface. / Sasmal, S., Bhardwaj, A., Abhaya, S., Pothala, R., Chaudhary, S., ... and Raman, K. V. // npj Quantum Materials. – 2020. – 5(1). – 64. – <https://doi.org/10.1038/s41535-020-00267-5>
14. Kander N. S. A comparative study of magnetic (Mn) and non-magnetic (In) elements-doped Bi₂Se₃ topological insulator: Structural, magnetic, transport, and weak anti-localization property exploration. / Guchhait, S., Biswas, S. and Das, A. K. // Materials Chemistry and Physics. – 2024. – 312, 128653. – <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128653>
15. Sasmal S. In-depth analysis of anisotropic magnetoconductance in Bi₂Se₃ thin films with electron–electron interaction corrections. / Mukherjee, J., Suri, D. and Raman, K. V. // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2021. – 33(46), 465601. – <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ac1de0>
16. Kander N. S. Obtained Berry phase and cyclotron mass of Bi₂Se₃ topological insulator thin film through weak anti-localization and Shubnikov-de Haas oscillation studies. / Gajar, B., Biswas, S., Moulick, S. and Das, A. K. // Physica Scripta. – 2024. – 99(9), 095968. – <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad6da6>

17. Singha P. Investigation of thermoelectric and magnetotransport properties of single crystalline Bi_2Se_3 topological insulator. / Das, S., Rana, N., Mukherjee, S., Chatterjee, S., Bandyopadhyay, S. and Banerjee, A. // Journal of Applied Physics. – 2024. - 135(2). - <https://doi.org/10.1063/5.0168564>

18. Druzhinin, A. Unconventional superconductivity in $\text{PdxBi}_2\text{Se}_3$ whiskers. / Ostrovskii, I., Khoverko, Y. and Mykytiuk, M. // Physics and Chemistry of Solid State. – 2023. - 24(3). - 558–563. - <https://doi.org/10.15330/pcss.24.3.558-563>

Надійшла до редакції 4.08.2025, розглянута на редколегії 4.08.2025

Comparative Analysis of Weak Antilocalization in $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ Whiskers and Related Topological Structures

This paper presents a comprehensive comparative review and detailed analysis of the weak antilocalization (WAL) effect observed in $\text{Pd}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ whiskers in comparison with well-established results for Bi_2Se_3 single crystals and thin films, which serve as benchmark systems for the study of topological insulators. The literature review highlights the influence of sample morphology, the nature of doping elements, structural disorder, and strong spin–orbit coupling on the parameters that govern coherent quantum transport in these materials. Special emphasis is placed on the unique combination of whisker-like morphology, Pd doping, and the observation of residual surface superconductivity in our samples, which makes these structures promising candidates for further research in the field of topological quantum matter. For comparison, three representative studies were selected: one describing WAL in Pd-doped Bi_2Se_3 single crystals grown by the zone-melting technique, another reporting on a detailed analysis of WAL and Shubnikov–de Haas (SdH) oscillations in undoped Bi_2Se_3 thin films, and a third study examining WAL and quantum oscillations in pure Bi_2Se_3 single crystals without any intentional doping. The comparative analysis shows that the phase coherence length in our whisker samples is lower than in massive single crystals and thin films, yet the unique combination of whisker morphology and Pd doping favors the coexistence of WAL with residual surface superconductivity, a feature not observed in previous Bi_2Se_3 systems. In addition, our measurements indicate the presence of weak nematic anisotropy, visible as a slight directional asymmetry of the upper critical magnetic field. Such a combination of features opens up new possibilities for studying the interaction between topologically protected surface states and superconducting phases, which is highly relevant for the design of novel quantum devices and spintronic applications. The results expand the current understanding of how topological surface states can be tuned and controlled through targeted engineering of the material's morphology, chemical composition, and growth conditions. This research provides a foundation for future experimental efforts aimed at optimizing the properties of nanostructured superconducting topological materials based on Bi_2Se_3 whiskers.

Keywords: Bi_2Se_3 , whiskers, weak antilocalization, spin–orbit interaction, Pd doping, residual superconductivity, nematicity, magnetoresistance

Відомості про авторів

Микитюк Михайло Петрович – аспірант кафедри напівпровідникової електроніки. Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна.

mykhailo.p.mykytiuk@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0318-7556>

Островський Ігор Петрович - доктор технічних наук, професор кафедри напівпровідникової електроніки. Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна. ihor.p.ostrovskyi@lpnu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7867-7132>

About authors

Mykytiuk Mykhailo – PhD student, semiconductor department. Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine. mykhailo.p.mykytiuk@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0318-7556>

Ostrovskii Igor – Doctor of Technical Sciences, Professor, semiconductor department. Lviv Polytechnic National University. Lviv, Ukraine. ihor.p.ostrovskyi@lpnu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7867-7132>