
DOI: 10.63527/1607-8829-2025-4-53-63

Ніколаєва А.А.¹ (<https://orcid.org/0000-0002-9998-207X>),
Конопко Л.А.¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5734-212X>),
Губер Т.Е.²,
Гергішан І.Г.¹ (<https://orcid.org/0000-0001-7301-9739>),
Пара Г.І.¹ (<https://orcid.org/0000-0001-6820-8914>),
Кобилянська А.К.³ (<https://orcid.org/0009-0007-5483-7614>)

¹Технічний університет Молдови, Інститут електронної інженерії та нанотехнологій “Д. Гіцу”, вул. Академії, 3/3, Кишинів, MD 2028, Молдова;

²Університет Говарда, хімічний факультет, Вашингтон, США;

³Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна

Автор-кореспондент: Ніколаєва А.А., e-mail: albina.prxima@gmail.com

Монокристалічні шари топологічних ізоляторів на основі телуриду вісмуту р- та n-типу для мікроохолоджуючих пристроїв

У статті представлені результати експериментальних досліджень термоелектричних властивостей та коливальних ефектів (коливань Шубнікова-де Гааза) монокристалічних шарів топологічних ізоляторів телуриду вісмуту р- і n-типу без підкладок, товщиною 17 мкм та 20 мкм відповідно, отриманих шляхом механічного відшаровування шарів з монокристалічного злитка відповідного складу за методикою, розробленою авторами статті. Циклотронні маси та квантові рухливості носіїв заряду, характерні для поверхневих станів топологічних ізоляторів, були оцінені з використанням експериментальних даних про коливання Шубнікова-де Гааза в повздовжніх ($B\parallel I$) та поперечних ($B\perp I$) магнітних полях до 14 Тл. Коефіцієнт сили був розрахований в діапазоні температур 2–300 К за температурними залежностями опору та термоерс. Встановлено, що максимальне значення коефіцієнта потужності спостерігається в діапазоні температур 100–250 К і відповідає найкращим максимальним значенням, доступним в літературі для ідеальних монокристалів. На основі отриманих шарів фольги Bi_2Te_3 р-типу і n-типу – Bi -17 ат%, було створено конструкцію – мікроохолоджувальний пристрій, який дозволяє отримати $\Delta T = 12^\circ$ на площі 0.01 см^2 , що є важливим

Цитування: Ніколаєва А.А., Конопко Л.А., Губер Т.Е., Гергішан І.Г., Пара Г.І., Кобилянська А.К. (2025). Монокристалічні шари топологічних ізоляторів на основі телуриду вісмуту р- та n-типу для мікроохолоджуючих пристроїв. Термоелектрика, (4), 55–65. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-4-53-63>

фактором для розробки нових високоефективних термоелектричних матеріалів на основі тонших шарів для їх практичного використання в мікроохолоджувачах.

Ключові слова: термоелектричні матеріали, топологічні ізолятори, шари, фольга, монокристалічні шари, Bi_2Te_3 , коливання Шубнікова-де Гааза, рухливість носіїв заряду, охолоджувальний пристрій.

Вступ

Термоелектричні матеріали, що перетворюють теплову енергію в електричну і навпаки, стали об'єктом підвищеної уваги у зв'язку з інтенсивним розвитком альтернативної енергетики [1–3]. Термоелектричні матеріали на основі твердих розчинів халькогенідів вісмуту та сурми широко використовуються в діапазоні температур, близьких до кімнатної, у різних охолоджувальних пристроях [4, 5].

Ефективність як генеруючих, так і охолоджувальних термоелектричних пристроїв залежить від безрозмірної термоелектричної ефективності матеріалу $ZT = \alpha^2 T / (\chi_e + \chi_l) \sim 1$ де α , σ , χ та T – коефіцієнт Зеебека (термоЕРС), σ – електропровідність матеріалу, χ – теплопровідність матеріалу, а T – абсолютна температура. Збільшення параметра ZT термоелектричних матеріалів у робочому діапазоні температур було одним із найважливіших завдань протягом останніх десятиліть.

В останні роки значна увага приділяється розвитку нових концепцій – низьковимірних структур [6, 8] та топологічних ізоляторів [9, 10]. Теоретичні розрахунки та експериментальні результати демонструють, що в структурах з обмеженими розмірами термоелектричну ефективність можна ефективно підвищити завдяки прояву квантового розмірного ефекту та збільшенню розсіювання фононів. У топологічних ізоляторах відбувається значна модифікація фононного спектру, а термоелектричні властивості суттєво залежать від складу, структури та розмірів досліджуваних об'єктів.

Метою цієї роботи було отримання монокристалічних шарів р- та n-типу без підкладок на основі телуриду вісмуту Bi_2Te_3 , дослідження коливань Шубнікова-де Гааза (ШдГ), розрахунок циклотронних мас та рухливості носіїв заряду, дослідження термоелектричних властивостей та оцінка термоелектричної ефективності в діапазоні температур 4.2–300 К. Використовуючи досліджувані матеріали, було створено мініатюрний охолоджувальний пристрій, що працює при 300 К.

1. Зразки та технологія виготовлення монокристалічних шарів Bi_2Te_3 n- та р-типу без підкладок

Відомо, що такі напівпровідники, як телурид (селенід) вісмуту та телурид сурми, являють собою шаруваті кристали ромбоєдричної структури з осями симетрії C_2 та C_3 . Для опису кристалічної структури найчастіше використовується гексагональна елементарна комірка. Кристалічна решітка утворена періодично впорядкованими шарами, що лежать у площині, перпендикулярній до осі симетрії C_3 (рис. 1, а). Як показано на рис. 1, а, кожен шар складається з п'яти атомних площин (квінтетів) у такій

послідовності: $Te_1-Bi-Te_2-Bi-Te_1$, де Te_1 та Te_2 позначають атоми телуру в різних положеннях. Якщо розглядати окремий шар, то атоми всередині нього ідентичні та розташовані, утворюючи плоску гексагональну решітку.

Відомо, що хімічний зв'язок у квінтетах є ковалентно-іонним. Квінтети розташовані відносно далеко один від одного та слабо зв'язані силами Ван-дер-Ваальса, що визначає анізотропію властивостей монокристала. Механічне розшарування відбувається в результаті руйнування слабких зв'язків Ван-дер-Ваальса між $Te(1)$ та $Te(1)$ та утворення кількох п'ятиатомних площин.

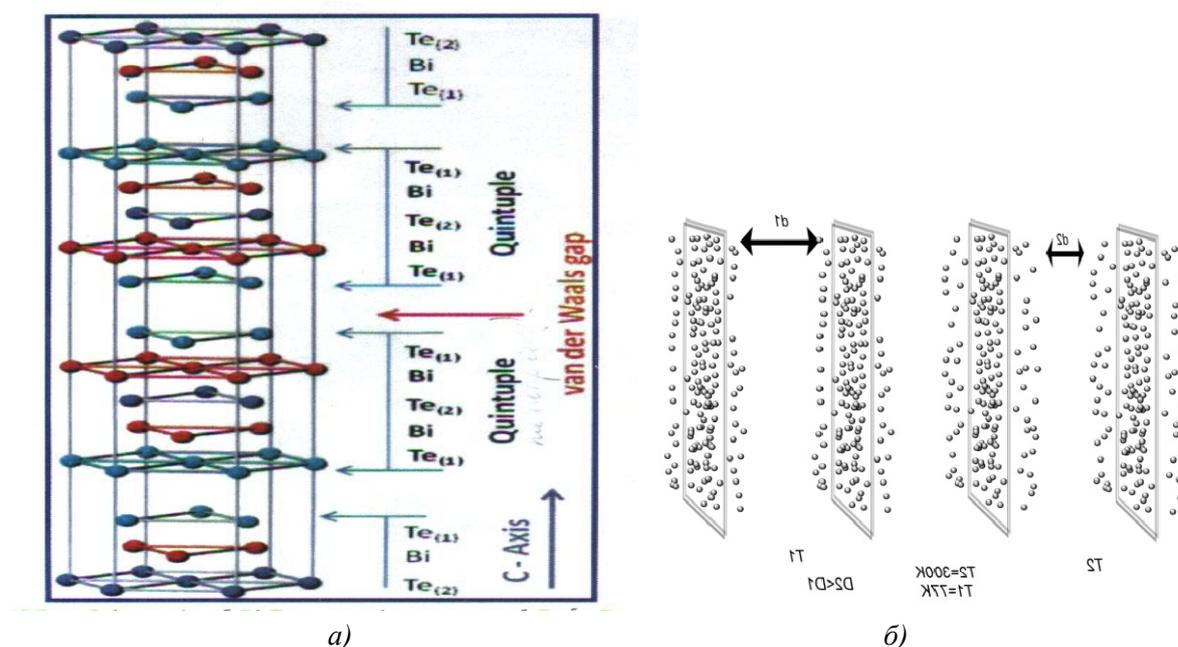


Рис. 1. (а): Схематичне зображення кристалічної структури Bi_2Te_3 $D3d5-R(-3)m$ – просторова група, що показує п'ятишарові шари та локалізацію ван-дер-ваальсової щілини, $Te(1)-Te(1)$ – слабкий зв'язок, а $Bi-Te(1)$ – сильний зв'язок. (б): схематичне зображення двох сусідніх атомних шарів $Te(1)-Te(1)$ при $T = 300 K$ (1) та $77 K$ (2)

Саме слабкий зв'язок дозволив нам отримати монокристалічні шари товщиною 5–20 мкм як на підкладках зі скотчу, так і без підкладок (патенти 11.12) шляхом механічного розшарування з монокристалічного злитка відповідного складу (рис. 2. а). Вихідні об'ємні зразки монокристалів відповідного складу були вирощені методом Бріджмена (рис. 2. а) та являли собою високоякісні монокристалічні злитки, що було підтверджено дослідженнями фотоемісійної спектроскопії з високою кутовою роздільною здатністю.

Рентгеноструктурні дослідження показали, що шари (товщиною $d = 5-20$ мкм), що відшаровуються від монокристалічного злитка, є монокристалами з віссю C_3 , перпендикулярною до площини шарів. Двондодний метод використовувався для вимірювання термоЕРС в діапазоні температур 2.1 К–300 К, а чотирисондовий метод – для дослідження опору, магнітоопору та коливань Шубнікова-де Гааза в діапазоні температур 2.1 К–4.2 К та магнітних полів до 14 Тл.

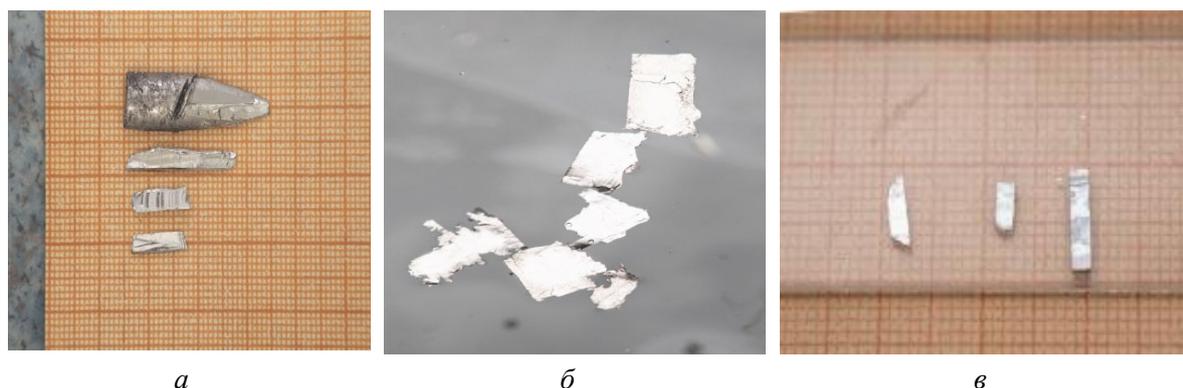


Рис. 2. а – об'ємний монокристалічний злиток Bi_2Te_3 та заготовки, вирізані з нього для розшарування, б – шари без підкладок на поверхні води (згідно з патентом 12), в – шари без підкладок, перенесені на міліметровий папір

Спеціальний обертовий пристрій дозволяв обертати зразок у магнітному полі B (до 14 Тл) у різних площинах за температур $2\text{К}–300\text{К}$ та вимірювати поперечний та поздовжній магнітоопір, їх анізотропію та коливання Шубнікова-де Гааза, розраховувати циклотронні маси та рухливість носіїв заряду.

2. Результати та обговорення

Досліджено діаграми обертання поперечного магнітоопору $R(O)$ та термоерс $S(O)$ монокристалічних шарів Bi_2Te_3 р- та n-типу товщиною 17 мкм та 20 мкм відповідно при температурах 4.2 К та 300 К та магнітних полях до 14 Тл, а також польові залежності поперечного ($B \perp I$) та поздовжнього ($B \parallel I$) магнітоопору при температурах 1.5 К–300 К. Анізотропія термоерс $\alpha(O)$ досить низька: $= 1.25–1.5$. На рис. 3 показано експериментальні польові залежності відносного $R_B/R_0(B)$ поздовжнього (1) та поперечного (2) магнітоопору в магнітних полях до 14 Тл шару Bi_2Te_3 -р, $d = 17$ мкм при 4.2 К.

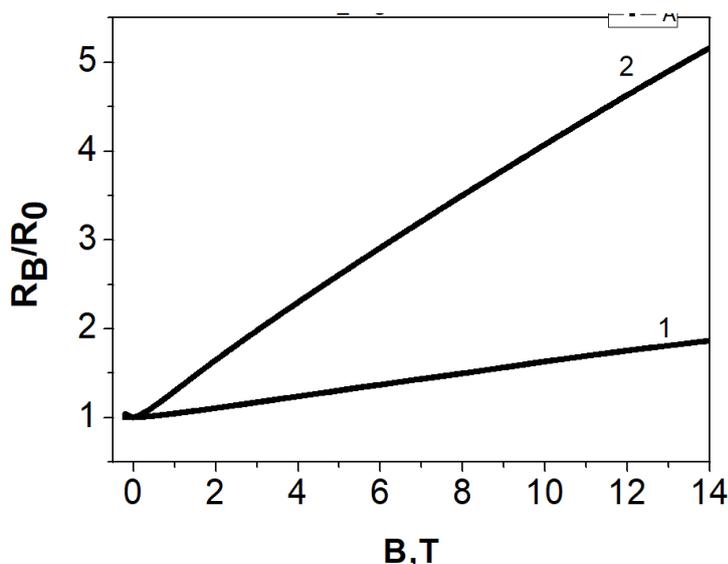


Рис. 3. Польові залежності представлених поздовжнього (1) та поперечного (2) магнітоопору $R_B/R_0(B)$ шарів Bi_2Te_3 -р типу, $d = 17$ мкм при 4.2 К

Анізотропія опору та магнітоопору A за низьких температур досить велика навіть у магнітних полях 14 Тл. $A = (R \setminus R //) = \underline{5}$.

На рис. 4 та 5 показано експериментальні польові залежності похідних поздовжнього та поперечного магнітоопору $dR/dB(B)$ за температур 4.2 К та 2.1 К для шарів р-типу та n-типу відповідно.

Для шарів р-типу частота коливань ШдГ, пропорційна поперечному перерізу поверхні Фермі, становить $f_1 = \Delta^{-1} = 11.6$ Тл для поздовжнього та $f_2 = \Delta^{-1} = 39$ Тл для поперечного магнітоопору.

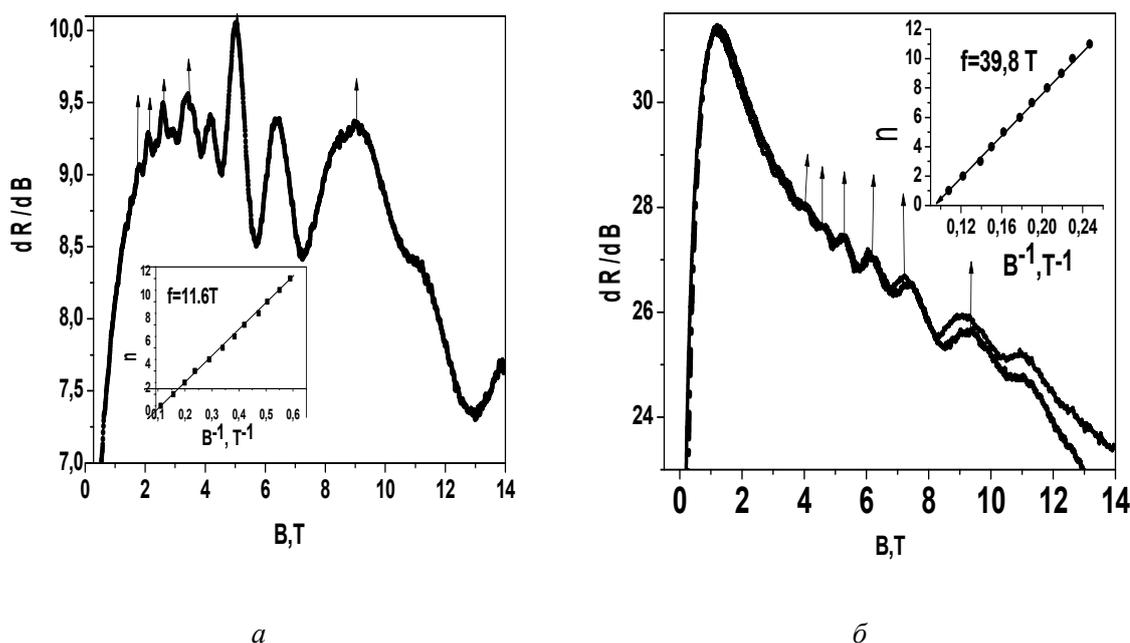


Рис. 4. Польові залежності похідних поздовжнього (а) та поперечного (б) магнітоопору $\partial R/\partial B(B)$ при 4.2 К та 2.1 К шарів Bi_2Te_3 р-типу, $d = 17$ нм
Всередині – залежності квантового числа n коливань ШдГ від B^{-1}

Було виявлено, що при $B \parallel I$ перехід в ультраквантову область магнітних полів (подвоєння періоду коливань ШдГ) відбувається в магнітному полі $B_{uqt} = 2-3$ Тл для поздовжнього магнітоопору та $B_{uqt} = 2-3$ Тл = 9 Тл для поперечного магнітоопору та вказує на спінове затухання першої гармоніки коливань ШдГ. Експериментальне значення фазового зсуву індексу рівнів Ландау було визначено з лінійної залежності квантового числа $n(B^{-1}) = 0$ шляхом екстраполяції залежності індексу n від оберненого магнітного поля $n(B^{-1})$ (вставки на рис. 4 (а, б)). Було виявлено, що фазовий зсув становить 0.5 як для поздовжнього, так і для поперечного магнітоопору, що типово для топологічних ізоляторів.

Магнітоопір у поперечному ($B \perp I$) та поздовжньому ($B \parallel I$) магнітних полях до 14 Тл досліджували в монокристалічних шарах Bi_2Te_3 n-типу в діапазоні температур 1.5–300 К. Експериментальні польові залежності приведенного магнітоопору $\Delta R/R(B)$ при 4.2 К та 2.1 К показані на рис. 5.

Дані, отримані за допомогою ефекту Шубнікова-де Гааза (SdH), були використані для розрахунку циклотронних ефективних мас та квантової рухливості носіїв заряду. Відомо, що частота квантових коливань магнітоопору f , згідно зі співвідношеннями Ліфшица-Онцайгера, пропорційна площі поперечного перерізу поверхні Фермі $S(k_F)$.

$$f = \Delta(B) = \left(\frac{\hbar}{2\pi e}\right) S(k_F),$$

де k – хвильовий вектор електрона, \hbar – редукована стала Планка.

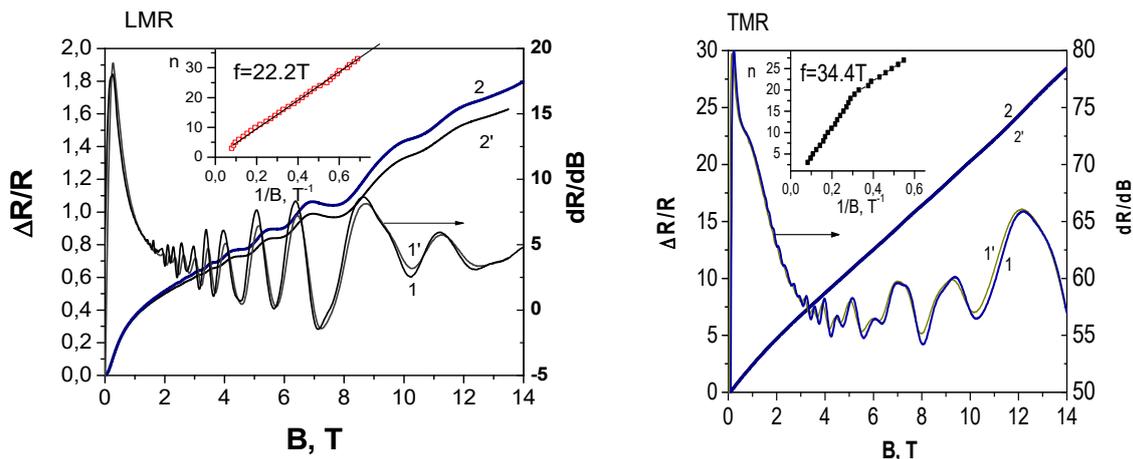


Рис. 5. Польові залежності зменшеного поперечного магнітоопору $\Delta R/R(B)$ (1) та похідної $dR/dB(B)$ (2) за температур 2.1 К (1, 2) та 4.2 К (1', 2') шару Bi_2Te_3 , $d = 20$ нм.

Вставка: залежність квантового числа n коливань ШДГ від оберненого магнітного поля B^{-1}

Температурні залежності амплітуди коливань ШДГ дозволили розрахувати ефективні циклотронні маси m_c при $B \parallel I$ та $B \perp I$.

Співвідношення амплітуд $A(T_1, B_n)$ і $A(T_2, B_n)$ наступне:

$$\frac{A(T_1, B_n)}{A(T_2, B_n)} = \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\text{sh}\left(\frac{2\pi^2 m^* c k T_2}{|e| \hbar B_n}\right)}{\text{sh}\left(\frac{2\pi^2 m^* c k T_1}{|e| \hbar B_n}\right)} \quad (1)$$

Цей вираз справедливий, якщо температура Дінгла $T_D = \pi \hbar / n \tau k$, яка характеризує розширення рівнів Ландау в результаті розсіювання носіїв заряду, залишається постійною в діапазоні температур від T_1 до T_2 .

За низьких температур час релаксації τ визначається домішками та недосконаlostями кристалічної решітки та практично не залежить від T , тобто в області залишкового опору, при $T \leq 4.2$ К. У нашому експерименті ця умова була виконана.

У випадку, коли $T_1 = 1/2 T_2$, вираз для ефективної маси циклотронного струму m^* має вигляд:

$$m^* = \frac{|e| \hbar B_n}{4\pi^2 m^* c k T_1} \text{Arch} \left[\frac{A(T_1, B_n)}{A(T_2, B_n)} \right] \quad (2)$$

Циклотронні маси, розраховані з виразом (2) із залежностей $dR/dB(B)$ при температурах 4.2 К та 2.1 К (рис. 2, 3), становили $m_c^2 = 0.11 m_0$ для поздовжнього

магнітоопору та $m_c^2 = 0.13 m_0$ для поперечного ($B \perp I$), що добре узгоджується з даними, отриманими на об'ємних зразках та плівках Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 за коливаннями ШДГ.

Температура Дінгла T_D , яка характеризує розширення рівнів Ландау в результаті розсіювання носіїв заряду, еквівалентне збільшенню температури на значення T_D , була визначена зі співвідношення амплітуд коливань ШДГ при двох послідовних значеннях магнітних полів B_n та B_{n+1} .

Значення розраховувалися для 5–6 точок (максимумів) на коливаннях ШДГ та визначалося середнє значення.

Співвідношення амплітуд становить:

$$\frac{A(T, B_n)}{A(T, B_{n+1})} = \left(\frac{B_{n+1}}{B_n}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\text{sh}\left(\frac{2\pi^2 m^* c k T}{|e| \hbar B_{n+1}}\right)}{\text{sh}\left(\frac{2\pi^2 m^* c k T}{|e| \hbar B_n}\right)} \times \exp\left[\frac{2\pi^2 m^* c k T_D}{|e| \hbar}\right] \left(\frac{1}{B_{n+1}} - \frac{1}{B_n}\right)$$

Де T_D було знайдено шляхом логарифмування. З коливань ШДГ на поздовжньому магнітоопорі розрахована температура Дінгла становила $T_D = 1.3$ К, а на поперечному $T_D = 6$ К.

Враховуючи, що температура Дінгла $T_D = \frac{\hbar}{\pi k_B} \cdot \frac{1}{\tau}$, де τ – час релаксації, рухливість носіїв заряду (квантову рухливість) визначали зі співвідношення:

$$\mu_s = \frac{\hbar e}{2\pi k_B} \cdot \frac{1}{m_e T_D}$$

і становила для поздовжнього магнітоопору $\mu = 12.09 \cdot 10^3$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$, а для поперечного $\mu^\perp = 2.32 \cdot 10^3$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$, що збігається зі значеннями, отриманими за ефектом Холла для плівок Bi_2Te_3 n-типу при $B \perp I$, та значно перевищує значення для поздовжнього магнітоопору $B \perp I$.

Для р-шарів циклотронне значення маси, розраховане згідно з виразом (2) із залежностей $\partial R/\partial B(B)$ для поперечного магнітоопору, становило $m_c^2 = 0.1 m_0$. А рухливість країв становила $\mu = 14.1 \cdot 10^3$ $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{сек}$.

Були досліджені температурні залежності питомого опору $\rho(T)$ та термоерс $\alpha(T)$ шарів Bi_2Te_3 р-типу з $d = 17$ мкм та n-типу з $d = 20$ мкм, на основі яких було розраховано температурну залежність коефіцієнта потужності $\alpha^2 \sigma(T)$

Температурні залежності параметра потужності $P.f. = \alpha^2 \sigma$ були визначені з даних термоЕРС та питомого опору. Максимальне значення P.f. становить $4.3 \cdot 10^{-6}$ $\text{Вт}/\text{см} \cdot \text{К}^2$ у широкому діапазоні температур 75 К–200 К. При 300 К $P.f. = 3.2 \cdot 10^{-6}$ $\text{Вт}/\text{см} \cdot \text{К}^2$. Використовуючи дані про термоелектричну ефективність шарів Bi_2Te_3 р- та n-типу, а також наші раніше отримані результати щодо термоелектричної ефективності фольг n-типу зі складом $\text{Bi}-17\% \text{Sb}$ [13], було досліджено залежність ефекту охолодження (градієнта температури) від струму, що проходить $\Delta T(I)$ через структуру у вигляді термопар з n- та р-шарів при 300 К.

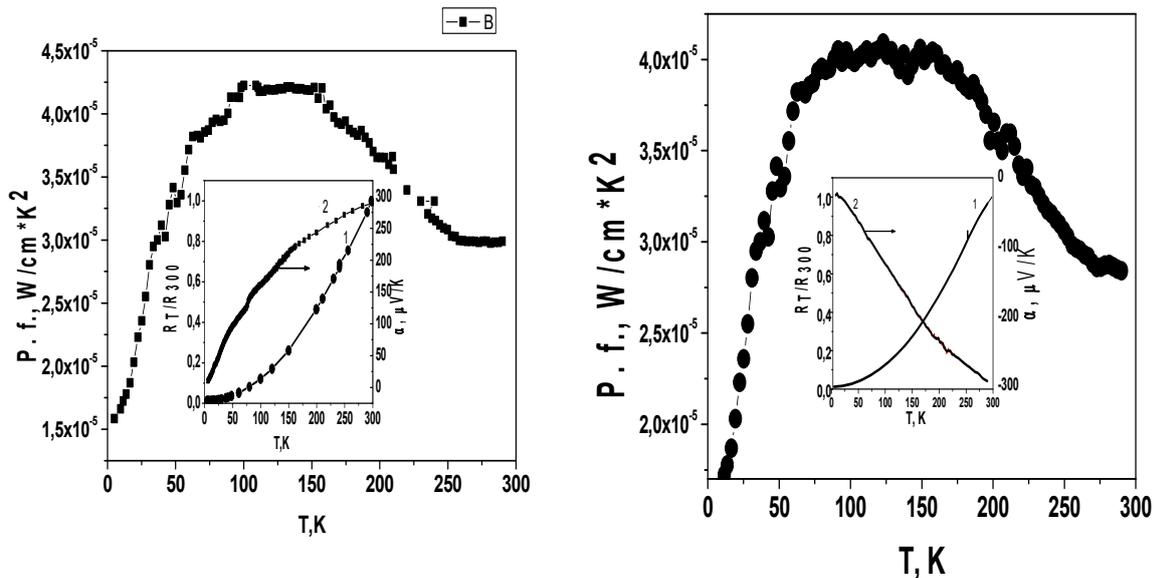


Рис. 6. Температурні залежності силового коефіцієнта $\sigma^2 \sigma(T)$ шару Bi_2Te_3 , n-типу $d = 20$ мкм (а) та p-типу $d = 17$ мкм (б). Вставка: температурні залежності відносного опору RT/R_{300} (крива 1) та термоерс $\alpha(T)$ (крива 2 – масштаб праворуч)

На рис. 7 показано залежність градієнта температури ΔT від постійного струму, що проходить через різні n-p структури при 300 К.

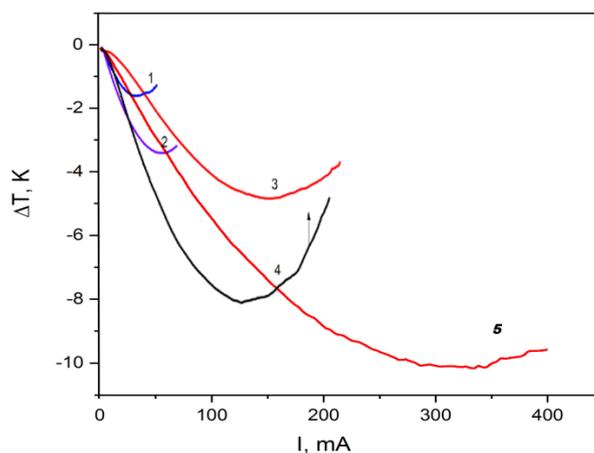


Рис. 7. Градієнт температури ΔT як функція струму, що проходить через: (крива 1) – одну термопару, виготовлену з шарів Bi_2Te_3 n та p-типу товщиною 20 мкм на підкладках зі скотчу, (крива 2) – дві сегментовані термопари Bi_2Te_3 n та p-типу на підкладках, (крива 3) – термопару, виготовлену з 1 шару Bi_2Te_3 n-типу без підкладки та 1 шару Bi_2Te_3 p-типу без підкладки, (крива 4) – термопару, виготовлену з 1 шару Bi_2Te_3 p-типу без підкладки та 1 фольги $Bi_{0.84}-Sb_{16}$ n-типу товщиною 20 мкм, (крива 5) – термопару, виготовлену з двох паралельно з'єднаних шарів Bi_2Te_3 p-типу без підкладок та 1 фольги $Bi_{0.84}-Sb_{16}$ n-типу товщиною 20 мкм.

Таким чином, досліджуваний пристрій дозволив отримати різницю температур $\Delta T = 12^\circ$ на площі 0.01 см^2 при 300 К (рис. 7).

Висновки

Методом механічного сколювання було отримано монокристалічні шари топологічного ізолятора Bi_2Te_3 n- та p-типу з товщиною шару 10–20 мкм без підкладок.

Частоту коливань ШдГ було розраховано з коливань ШдГ, а також оцінено циклотронні маси, температуру Дінгла та рухливість носіїв заряду для двох напрямків магнітного поля. Було показано, що квантова рухливість носіїв заряду при 4.2 К для $H \parallel I$ перевищує значення, отримані для об'ємних зразків та плівок відповідного складу.

Було виявлено, що фазовий зсув індексу рівнів Ландау становить 0.5 як у паралельному, так і в перпендикулярному магнітних полях, що підтверджує наявність поверхневих станів шарів топологічних ізоляторів Bi_2Te_3 .

Розраховані значення температурної залежності силового фактора мають широкий максимум в діапазоні температур 75–200 К, в області 300 К.

Використовуючи дані про термоелектричну ефективність шарів Bi_2Te_3 p-типу товщиною 17 мкм та результати, отримані нами раніше на фользі Bi-17 at \% Sb (n-тип, товщиною 20 мкм), було розроблено та досліджено мініатюрний мікроохолоджувальний пристрій у вигляді термопари, виготовленої з шарів Bi_2Te_3 p-типу та фольги n-типу Bi-17 at \% Sb , що дозволяє отримати різницю температур $\Delta T = 12^\circ$ на площі 0.01 см^2 при 300 К, що є важливим фактором та відкриває шляхи підвищення термоелектричної ефективності та термоохолоджувального ефекту при 300 К.

Інформація про авторів

Ніколаєва А.А. – Доктор, професор, головний науковий співробітник.

Конопко Л.А. – Доктор, провідний науковий співробітник.

Губер Т.Е. – Доктор, професор Університету Говарда.

Гергішан І.Г. – Науковий співробітник.

Пара Г.І. – Доктор, старший науковий співробітник.

Кобилянська А.К. – Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

Література

1. Rowe D.M. (2006). Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, 1(1), 13–23.
2. Tritt T.M., Subramanian M.A. (2006). Thermoelectric materials, phenomena, and applications: a bird's eye view. *MRS bulletin*, 31 (03), 188198.
3. Dresselhaus M.S., Thomas I.L. (2001). Alternative energy technologies. *Nature*, 414 (6861), 332–337.

4. Bell L.E. (2008). Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, 321(5895), 1457–1461.
5. DiSalvo F.J. (1999). Thermoelectric cooling and power generation. *Science*, 285(5428), 703–706.
6. Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T., et al. (2001). Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit. *Nature*, 413(6856), 597–602.
7. Sales B.C. (2002) Thermoelectric materials-smaller is cooler. *Science*, 295(5558), 1248–1249.
8. Dresselhaus M.S, Chen G, Tang M.Y., et al. (2007). New directions for low-dimensional thermoelectric materials. *Adv. Mater.*, 19(8) ,1043–1053.
9. Fu L and Kane (2007). Topological insulators with inversion symmetry, *Phys. Rev B*, 76(4), 045402.
10. D.X. Qu, D.-X., Hor, Y.S., Xiong, J., Cava, R.J., et al. (2010). Quantum oscillations and Hall anomaly of surface states in the topological insulator Bi₂Te₃, *Science*, 329(5993), 821.
11. NIKOLAEVA Albina, MD, KONOPKO Leonid, MD, BODIUL Pavel, MD, GHERGHISAN Igor, COROMISLICENCO Tatiana, MD, PARA Gheorghe, MD. Metoda de obtinere a peliculelor monocristaline subtiri. *Brevet MD 1366 Z 2020.03.31*
12. NIKOLAEVA Albina, MD, KONOPKO Leonid, MD, GHERGHISAN Igor, MD, PARA Gheorghe, MD, COROMISLICENCO Tatiana, Procedeu de odținere a straturilor monocristaline subțiri de tipul Bi₂Te₃, Bi₂Se₃, Bi_{1-x}Sb_x. *Brevet MD 11818 Z 2025.08.31. MD.*
13. Nikolaeva A.A., Konopko L.A., Gherghisan I., Rogatsky K., Stakhoviak R., Ezhovsky A., Shepelevich E., Prokoshin V., Gusakova S. (2018). Thermoelectric efficiency of foils of semi-metallic and semiconductor alloys Bi_{1-x}Sb_x *Low Temperature Physics*, 44(8), 996–1003.

Submitted: 27.10.25

A.A. Nikolaeva¹ (<https://orcid.org/0000-0002-9998-207X>),

L.A. Konopko¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5734-212X>),

T.E. Huber²,

I.G. Gherghisan¹ (<https://orcid.org/0000-0001-7301-9739>),

G.I. Para¹ (<https://orcid.org/0000-0001-6820-8914>),

A.K. Kobylanska³ (<https://orcid.org/0009-0007-5483-7614>)

¹Technical University of Moldova, Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies „D. GHÎȚU”, Academiei, 3/3, Chișinău, MD 2028, Republic of Moldova;

²Howard University, Department of Chemistry, Washington, USA;

³Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine

Single-Crystal Layers of p- and n-Type Bismuth Telluride Topological Insulators for Micro-Cooling Devices

The paper presents the results of experimental studies of the thermoelectric properties and oscillation effects (Shubnikov-de Haas oscillations) of single-crystal layers of bismuth telluride topological insulators of p- and n-type without substrates, with thicknesses of 17 μm and 20 μm , respectively, obtained by mechanical exfoliation of layers from a single-crystal ingot of the corresponding composition using a technique developed by the authors of the article. Cyclotron masses and charge carrier quantum mobilities characteristic of surface states of topological insulators were estimated using experimental data on Shubnikov-de Haas oscillations in longitudinal ($B\parallel I$) and transverse ($B\perp I$) magnetic fields up to 14 T. The force factor was calculated in the temperature range of 2–300 K from the temperature dependences of resistance and thermoelectric power. It was established that the maximum value of the power factor $\alpha^2\sigma$ was observed in the temperature range of 100–250 K and corresponds to the best maximum values available in the literature for perfect single crystals. Based on the obtained layers of Bi_2Te_3 p-type and n-type foil – Bi-17 at%, a design was created – a micro-cooling device that allows obtaining $\Delta T = 12^\circ$ on the area of 0.01 cm^2 , which is an important factor for the development of new highly efficient thermoelectric materials based on thinner layers for their practical use in micro-coolers.

Keywords: thermoelectric materials, topological insulators, layers, foil, single-crystal layers, Bi_2Te_3 , Shubnikov-de Haas oscillations, charge carrier mobilities, cooling device.

Надійшла до редакції 27.10.25