

Shailendra Kumar Gupta¹ (<https://orcid.org/0009-0005-5074-1581>),
Pragya Agarwal¹ (<https://orcid.org/0009-0007-6515-1909>),
Manoj Kumar² (<https://orcid.org/0000-0003-4048-3687>),
Sudhir Kumar Sharma² (<https://orcid.org/0009-0002-6206-8417>),
Suresh Kumar Sharma³ (<https://orcid.org/0000-0001-6271-1762>)

¹Кафедра фізики, Коледж D.B.S., Університет
Чхатрапаті Шаху Джі Махараджа, Канпур, Індія;

²Кафедра фізики, Технічний університет
Харкорта Батлера, Канпур, Індія;

³Кафедра фізики, Технічний університет
Харкорта Батлера, Канпур, Індія

Corresponding author: Suresh Kumar Sharma, e-mail: sksharma@csjmu.ac.in

Низькотемпературний неорганічний термоелектричний телуридний матеріал р-типу: огляд

Відновлювані джерела енергії, такі як термоелектричні матеріали, будуть важливими для вирішення енергетичних криз та зростання глобального попиту в майбутньому. Ці матеріали мають багато переваг для використання у виробництві електроенергії, охолодженні та опаленні, і можуть генерувати корисну електроенергію з різних джерел відпрацьованого тепла, що працюють у різних температурних діапазонах. Наша увага зосереджена на низькотемпературному неорганічному термоелектричному телуриді (ТЕТ) р-типу, придатному для роботи за температури, близької до кімнатної. Цей огляд починається з фундаментального розуміння термоелектричних матеріалів, методологій їх синтезу та передових стратегій підвищення характеристик. Низькотемпературні телуридні ТЕ матеріали на основі халькогенідів відіграють дуже важливу роль і створюють основу для майбутніх застосувань, а також пропонують перспективи. Нарешті, ми підсумовуємо проблеми та майбутні перспективи неорганічних ТЕ матеріалів.

Ключові слова: термоелектричні матеріали, телуридні термоелектричні матеріали, низькотемпературна термоелектрика, відновлювана енергія.

Цитування: Shailendra Kumar Gupta, Pragya Agarwal, Manoj Kumar, Sudhir Kumar Sharma, Suresh Kumar Sharma (2026). Низькотемпературний неорганічний термоелектричний телуридний матеріал р-типу: огляд. *Термоелектрика*, (2), 58–90. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2026-2-58-90>

Отримано: 08.10.2025; Переглянуто: 29.05.2026; Опубліковано: 30.06.2026

© 2026 Автори. Це стаття з відкритим доступом, що розповсюджується відповідно до умов ліцензії Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Вступ

Зростання населення світу та швидкий розвиток економіки вимагають більшого глобального попиту на стійкі та чисті джерела енергії для життя людини та промислового виробництва, що значною мірою стримується зростанням цін на електроенергію [1]. Згідно з міжнародним енергетичним прогнозом 2019 року, Адміністрація енергетичної інформації США прогнозує, що споживання енергії зросте на 50 % з 2018 по 2050 рік. У традиційному викопному паливі (вугіллі, природному газі, нафті та нафтопродуктах) під час спалювання лише 35 % вивільненої енергії використовується ефективно, а решта втрачається у вигляді відпрацьованого тепла в навколишньому середовищі [2, 3]. Для вирішення цих проблем відновлювані джерела енергії, такі як вітер, сонце та термоелектричні (ТЕ) матеріали, будуть важливими для вирішення енергетичних криз у майбутньому. Ці матеріали мають такі переваги, як безшумність, відсутність вібрації, прості твердотільні пристрої, тривалий термін служби, відсутність рухомих частин, мала вага, не потребують обслуговування, нульові викиди парникових газів, екологічність, що робить їх придатними для використання у виробництві електроенергії, охолодженні та опаленні, тощо [4–5].

Концепція термоелектричного ефекту базується на трьох фундаментальних принципах: ефекті Зеебека (відкритому в 1821 році німецьким вченим Томасом Йолганном Зеебеком), ефекті Пельтьє (відкритому в 1834 році французьким вченим Жаном Шарлем Атанасом Пельтьє) та ефекті Томсона, що спостерігалися в 19 столітті і, як наслідок, їх застосуванні в термометрії, виробництві електроенергії та охолодженні (охолодження електронних пристроїв).

Електричний струм, індукований градієнтом температури, називається термоелектрикою [6]. Комерційне застосування обмежене через низький ККД, який становить приблизно від 5 % до 20 %, відносно вартість у порівнянні з традиційним виробництвом електроенергії та іншими технологіями перетворення.

Ефективність термоелектричних матеріалів визначається ефективністю перетворення тепла на електрику. Вона залежить від безрозмірного ключового параметра термоелектричних матеріалів, що називається коефіцієнтом якості і часто позначається як «ZT» [11]. ZT визначається так

$$ZT = S^2 \sigma T / \kappa.$$

Де S – коефіцієнт Зеебека, T – абсолютна температура, σ – електропровідність, а κ – теплопровідність. Для ідеального ТЕ матеріалу, ZT має бути високим. З цієї причини необхідно мати високий S для великої термонапруги, високий σ для зменшення ефекту Джоулевого нагріву та низький κ для великої різниці температур. Еволюція високоякісних ТЕ матеріалів вимагає глибокого розуміння явищ електронного транспорту. Для підвищення ефективності перетворення енергії пропонуються різні стратегії, такі як оптимальна концентрація носіїв заряду, зниження κ за допомогою наноструктурування та інженерія дефектів маси [12–13].

Дотепер детально вивчалися різні неорганічні ТЕ матеріали. З 1950-х та середини 1990-х років дослідження в галузі ТЕ матеріалів зосереджувалися на покращенні ТЕ характеристик неорганічних матеріалів, таких як сплави на основі Bi-Te та Pb-Te [14–16]. У 1950-х роках дослідження халькогенідних напівпровідників, особливо телуридів, таких як Bi₂Te₃ та PbTe, та халькогенідного скла-напівпровідника викликали значний інтерес через великий коефіцієнт термоЕРС та малі значення ρ та змінні значення σ .

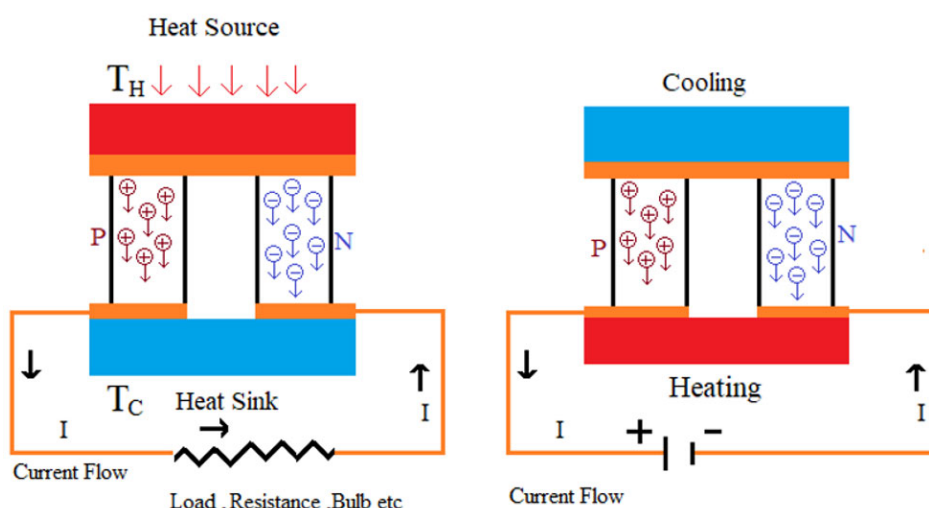


Рис. 1.1. (а) Ефект Зеебека, (б) ефект Пельтьє

ТЕ матеріали класифікуються на три основні категорії залежно від їх робочих температур: низькотемпературні від 273 К до 500 К (властивості кімнатної температури є корисною базовою лінією), середньотемпературні від 500 К до 900 К та високотемпературні від 900 К до 1300 К ТЕ матеріали.

1.1. Низькотемпературні термоелектричні матеріали (LTTEM)

У цій категорії існує сімейство ТЕ матеріалів, придатних для робочої температури нижче 500 К. Їх також називають ТЕ матеріалами для робочої температури, близької до кімнатної, такі як сплав на основі вісмуту [17], халькогеніди вісмуту (Bi₂Se₃, Bi₂Te₃, Bi₂S₃), халькогеніди сурми, Sb₂Se₃, Sb₂Te₃, Sb₂S₃.

1.2. Середньотемпературні термоелектричні матеріали (MTTEM)

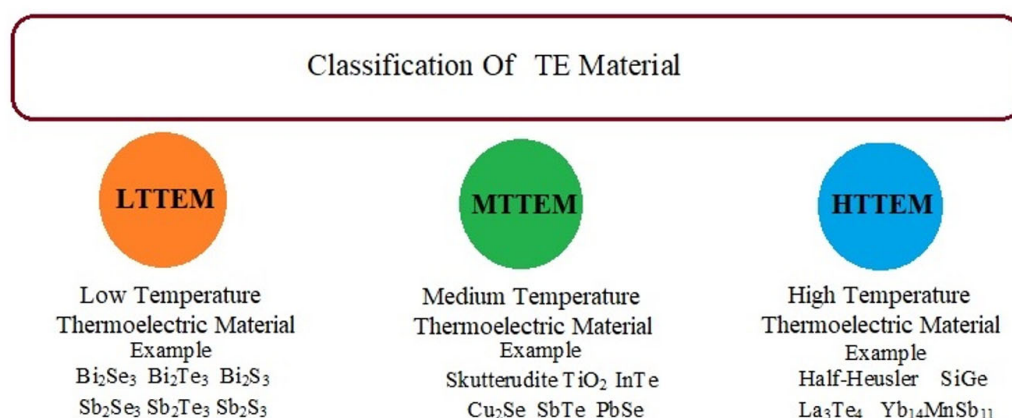


Рис. 1.2. Класифікація ТЕ матеріалів

У цій категорії існує сімейство ТЕ матеріалів, придатних для робочих температур від 500 К до 900 К. Такі як скутерудит TiO_2 [18] на основі Cu_2Se [19–23], халькогенід олова (SnSe , SbTe , SnS) [24–29], халькогенід свинцю (PbTe , PbSe , PbS [30–34]), халькогенід GeTe [35], халькогенід індію (InSe , InTe , InS), халькогенід германію (GeTe , GeSe , GeS) [36–41].

1.3. Високотемпературні термоелектричні матеріали (НТТЕМ)

Ця категорія включає сімейство ТЕ матеріалів, придатних для роботи за температур понад 900 К, таких як SiGe , La_3Te_4 [42], $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$, напів-Гейслер [43].

ТЕ матеріал може генерувати корисну відновлювану електроенергію з різних джерел відпрацьованого тепла, що працюють у різному температурному діапазоні. Близько 70% енергії, що виробляється у світі, розсіюється в навколишнє середовище у вигляді відпрацьованого тепла. Розподіл відпрацьованого тепла залежно від температури [44] показано на рис. 1.3, на якому 63% розсіюється при низькій температурі.

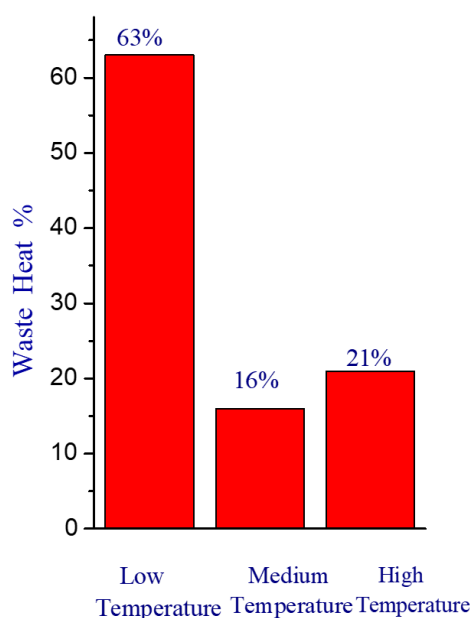


Рис. 1.3. Розподіл відпрацьованого тепла на основі температури

Термоелектрика – це спосіб перетворення цього відпрацьованого тепла на стійку та корисну енергію за низькою ціною. Промисловість XXI століття споживає енергію для різних виробничих процесів, на яких понад 60 % загальної енергії втрачається у вигляді відпрацьованого тепла [45, 46], і це відпрацьоване тепло можна легко зібрати та повторно використати в промисловості в діапазоні температур менше 573 К [47] за допомогою традиційних технологій перетворення енергії [48].

У цьому огляді обговорюються характеристики, властивості, продуктивність за низьких температур та температур, близьких до кімнатної, для кращого розуміння модифікації та покращення різних параметрів, а також варіації параметрів широкого спектру неорганічних ТЕ матеріалів у категоріях сімейств телуридів р-типу. Нарешті, ми підсумовуємо проблеми та перспективи розвитку неорганічних ТЕ матеріалів. У цьому огляді також висвітлено взаємозв'язок, подібність та відмінності сучасних матеріалів.

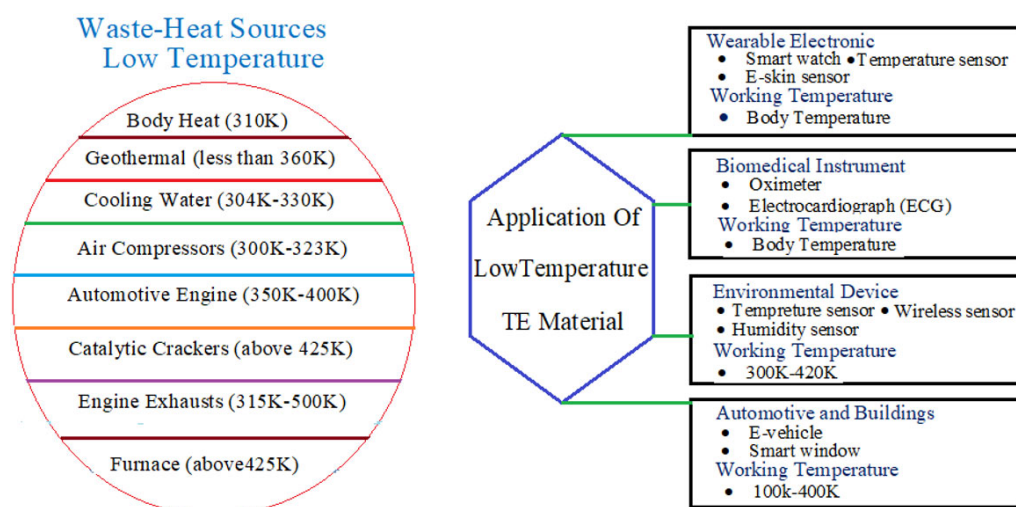


Рис. 1.4. Джерела відпрацьованого тепла та застосування низькотемпературного TE матеріалу

2. Низькотемпературні телуридні TE матеріали P-типу

Телуридні матеріали, такі як телурид вісмуту Bi_2Te_3 , були визнані першими комерційними TE матеріалами та працюють при низьких температурах, а їхні пікові характеристики знаходяться поблизу 380 K, оскільки цей матеріал є найбільш придатним для термоелектриків при низьких температурах. Особливістю низькотемпературної залежності телуриду p-типу є раннє досягнення дуже чіткого піку, після якого ZT зменшується зі збільшенням температури. Така властивість показує діапазон робочих температур, в якому він найбільш придатний для термоелектриків. Тому середнє значення ZT може бути важливішим для визначення характеристик в одному температурному діапазоні. Здебільшого матеріали n-типу показують вище значення ZT , ніж матеріали p-типу.

2.1. Низькотемпературні телуридні TE матеріали P-типу на основі Ві

У 1954 році вперше було запропоновано, що Bi_2Te_3 є низькотемпературним термоелектричним матеріалом, який кристалізується у шістнадцяткову шарувату кристалічну структуру з 5 атомними шарами Te1-Bi-Te2-Bi-Te1 . Він має низьку температуру плавлення 585°C (858 K) і може працювати до 227°C (500 K). Це напівпровідник з непрямою шириною забороненої зони ($E_g \sim 0.15$), сильно виродженою зонною структурою та низькою ефективною масою, що призводить до високого коефіцієнта термоЕРС.

Він має низьку температуру плавлення 585°C (858 K) і може працювати до 227°C (500K). Це напівпровідник з непрямою шириною забороненої зони ($E_g \sim 0.15$), сильно виродженою зонною структурою та низькою ефективною масою, що призводить до високого коефіцієнта термоЕРС. Масивний Bi_2Te_3 був отриманий Tang та ін. методом зонної плавки та SPS, які виявили зниження κ і зростання σ коли швидкість прокатки збільшується, а максимальний коефіцієнт Зеєбека ($234 \mu\text{V/K}$), σ (1100 S/cm), $\text{PF}(49.43 \mu\text{W/cm K}^2)$, добротність $ZT(1.35)$ і мінімальний κ (1.09 W/mK) було отримано

при кімнатній температурі [49]. Poudel та ін., синтезуючи сплав, що складається з Bi і Sb, виявили, що цей процес легування дає σ (1250 S/cm), PF (42.78 $\mu\text{W}/\text{cm K}^2$), а ZT дорівнює 1.4 [50]. Процес наноструктурування для отримання Xie та ін. системи р-типу Bi_2Te_3 дає ZT ~ 1.5 і низьку теплопровідність решітки $\kappa_{\text{lattice}} \sim 0.8$ Вт/мК [51]. Нанозерниста архітектура $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ р-типу з розміром зерна 2.50 нм забезпечує ZT ~ 1.36 при 87 °C, через що значно знижується κ (~ 0.9 Вт/мК). Наноккомпозит, що складається з $(\text{Bi}_2\text{Te}_3)_{0.2}(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_{0.8}$, отриманий методом кульового млина з аморфними наночастинками SiO_2 розміром ~ 50 нм, був синтезований методом наночастинкової плазми (IPS), що дає ZT 1.12 та 1.27 при 30 °C (303 K) та 90 °C (363 K) та збільшує коефіцієнт потужності через зниження теплопровідності через розсіювання фононів на фазових межах та наночастинках.

Розвиток когерентного інтерфейсу між наночастинками SiC та матрицею $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_3$ покращує коефіцієнт термоЕРС, механічні властивості та зменшує теплопровідність завдяки збільшенню розсіювання фононів [52]. Легування рідкісноземельними матеріалами (Ce, Y та Sm) в $\text{R}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{2.3}$ досягає ZT 1.21 при 140 °C (413 K) для $\text{Y}_{0.2}\text{Bi}_{1.8}\text{Se}_{0.3}\text{Te}_{2.7}$. Центрифугування розплаву ефективно контролює мікроструктуру в $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ з мікромасштабним масивом дислокацій та пористою мережею, що забезпечує кращі ТЕ показники (TE), ніж ZM та HP [53]. Рідкофазне спікання використовується для створення низькоенергетичної межі зерен з щільним масивом дислокацій, що призводить до розсіювання фононів середньої частоти без одночасного зменшення швидкості носіїв заряду та рекордно високого термоелектричного значення ZT р-типу 1.86 при 320 K у сплаві $(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$ [54]. Для великомасштабного виробництва матеріалу р-типу $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_{3.01}$ з самокомпенсацією Te методом кульового фрезерування, що призводить до високого середнього значення ZT 1.39 від 30 до 200 °C та пікового значення 1.55 при 100 °C, низької теплопровідності 0.48 Вт·м⁻¹К⁻¹ [55].

Термоелектричні властивості спеченого об'єму $\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{1.7}\text{Te}_{3.01}$, сформованого методом МА з використанням фрезерного середовища YSZ з подальшим високочастотним видавлюванням (HP), забезпечують високі термоелектричні характеристики за кімнатної температури $S = 227$ мкВ/К, $\sigma = 9.81 \times 10^4$ S/м, $\kappa = 1.17$ Вт/мК [56]. Зразки Bi_2Te_3 Р-типу, підготовлені методом гарячої екструзії (HE), дозволяють досягти кількісного контролю над розміром зерна, межами зерен, властивими точковими дефектами та дислокаціями, що регулюють термоелектричні характеристики, і забезпечують низьку теплопровідність 0.73 Вт/мК при 300K, практично високу ZT ~ 1.1 за кімнатної температури [57]. Сплав $\text{Bi}_{0.50}\text{Sb}_{1.50}\text{Te}_3$, отриманий методом плавлення-загартування в поєднанні з процесом SPS, з високим вмістом легуючої домішки Sb посилює розсіювання на точкових дефектах, що призводить до збільшення розсіювання на довгохвильових фононах і зниження теплопровідності решітки [5]. Наноструктурований композит Р-типу $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, отриманий методом SPS з порошку, приготованого методом швидкого охолодження розплаву, з додаванням 0.10 % мас. графенових пластин, збільшує його ZT [59]. Легування Pb Bi_2Te_3 може змінити тип носіїв заряду з n-типу на р-тип з високим ZT [60].

Таблиця 1

Фізичні та термоелектричні властивості низькотемпературного
телуриду р-типу на основі Bi

	Матеріал	S, мкВ/К	σ , S/см	κ , Вт/мК	ZT	T, К	Посилання	Рік
1	Bi ₂ Te ₃ (ZM)	227	940	1.81	0.8	300K	49	2007
2	Bi ₂ Te ₃ (ZM)	234	650	1.97	0.65	360K	49	2007
3	Bi ₂ Te ₃ (ZM)	225	550	2.5	0.45	420K	49	2007
4	Bi ₂ Te ₃ (SPS)	212	1100	1.09	1.35	300K	49	2007
5	Bi ₂ Te ₃ (SPS)	222	800	1.09	1.3	360K	49	2007
6	Bi ₂ Te ₃ (SPS)	220	620	1.2	1.05	420K	49	2007
7	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ (NC-BM+HP)	185	1250	1.12	1.2	300K	50	2008
8	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ (NC-BM+HP)	212	750	1.04	1.4	400K	50	2008
9	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃ (NC+BM+HP)	201	490	1.27	0.8	500K	50	2008
10	Bi ₂ Te ₃ (MS+SPS)	225	625	0.8	1.5	390K	51	2010
11	5%Bi ₂ Te ₃ -Ge _{0.87} Pb _{0.13} Te	130	1087	1.05	0.66	373K	62	2014
12	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	241	647	0.33*	1.86	320K	54	2015
13	Bi _{0.3} Sb _{1.625} In _{0.075} Te ₃	185	890	0.61*	0.75	300K	63	2016
14	Bi _{0.3} Sb _{1.625} In _{0.075} Te ₃	220	618	1.09	1.4	500K	63	2016
15	Bi _{0.5} Sb _{1.495} Cu _{0.005} Te ₃	154	1371	0.34*	0.97	300K	64	2016
16	Bi _{0.5} Sb _{1.495} Cu _{0.005} Te ₃	201	610	0.31*	1.4	450K	64	2016
17	Bi _{0.05} Sb _{0.1} TeGe _{0.85}	130	805	0.48*	0.47	300K	65	2017
18	Sn _{0.97} Bi _{0.03} Te-3%PbTe	27	4847	1.15*		300K	66	2017
19	Bi _{0.5} Sb _{1.5} Te ₃	237	600	0.65*	1.24	350K	67	2018
20	Bi _{0.46} Sb _{1.54} Te _{3.015} Zn _{0.015}	185	1220	0.52*	1.14	300K	68	2018
21	Bi _{0.46} Sb _{1.54} Te _{3.015} Zn _{0.015}	208	850	0.5*	1.4	373K	68	2018
22	Bi _{0.4} Sb _{1.6} Te ₃	232	778	1.03	1.38	323K	69	2019
23	(GeTe) _{0.8} (AgBiSe ₂) _{0.2}	242	124	0.28*	0.63	300K	70	2019
24	(GeTe) _{0.8} (AgBiSe ₂) _{0.2}	279	150	0.32*	1.3	467K	70	2019
25	BiCuO _{0.88} Te	185	336	0.59*	0.48	323K	70	2020
26	Bi _{1.04} Sb _{1.6} Te _{3.01}	195.37	1145.9			300K	55	2021
27	Bi ₂ Te _{2.8} Se _{0.2} (ZM)	205		1.5	1.05	410K	61	2021
28	Bi _{0.3} Sb _{1.7} Te _{3.01} (MA+YSZ+HP)	227	981	1.17	1.30	300K	56	2022
29	Bi _{1.99} Pb _{0.01} Te ₃	157	931		0.42	300K	60	2023
30	Bi _{0.50} Sb _{1.50} Te ₃	261		1.32			58	2024
31	Bi _{0.3} Sb _{1.7} Te ₃ (HP-HE)	197	1260	1.45	1.1	300K	57	2024
32	Bi _{0.3} Sb _{1.7} Te ₃ (ZM)	208	1160	1.56		300K	57	2024
33	Bi _{0.3} Sb _{1.7} Te ₃ (HP)	199	1050	1.37		300K	57	2024
34	Bi _{1.5} Sb _{1.5} Te ₃ +0.10%wt Graphene	190	983	.01186	0.89	300K	59	2024

ZM=зонне плавлення, NC=нанокристалічний, BM=кульове подрібнення, MS=спінінг розплаву*-к_L

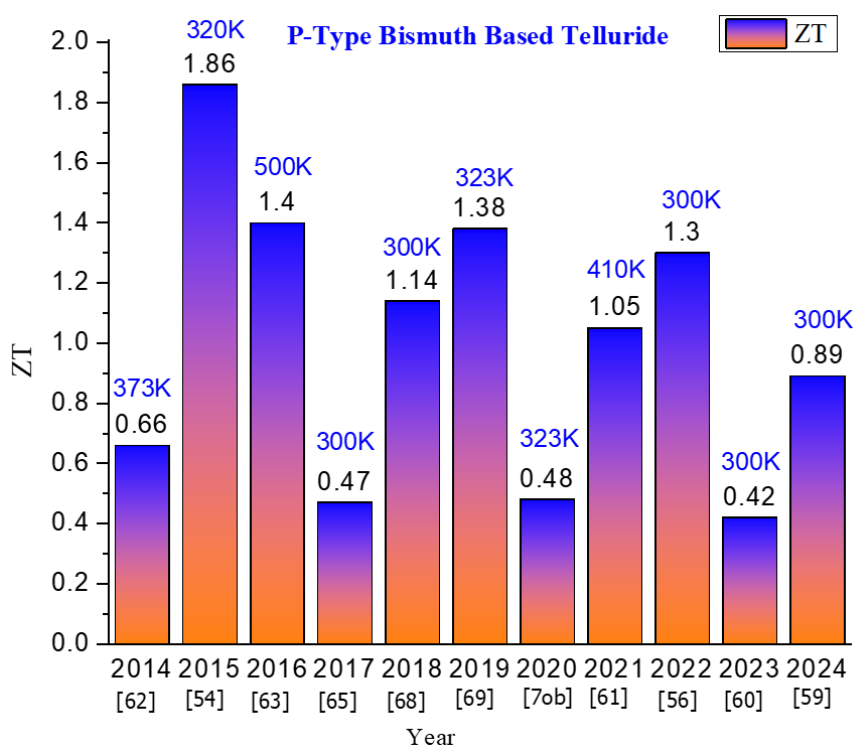


Рис. 2.1. ZT різних TET p-типу на основі вісмуту за різних температур і років

2.2. Низькотемпературні телуридні TE матеріали p-типу на основі Pb

Термоелектричний матеріал на основі телуру, PbTe, використовується вже 50 років і демонструє низький коефіцієнт теплопровідності κ 2.3 Вт/мК і високий коефіцієнт Зеебека 500 мкВ/К при кімнатній температурі, а також ширину забороненої зони 0.32 еВ. PbTe, збагачений телуром, є напівпровідником p-типу. Кристалічний PbTe у кубічній структурі типу кам'яної солі при кімнатній температурі демонструє як зворотне розташування зон, так і стратегії формування резонансних рівнів, що вперше було продемонстровано у PbTe. Формування резонансних рівнів у PbTe за рахунок легування топологічними ізоляторами призводить до найвищого значення ZT ~ 1.5 у 2008 році, а злиття зон у PbTe 1-X: Na призводить до найвищого значення ZT ~ 1.8 у 2011 році. Ще один успішний підхід, заснований на модифікації розсіювання фононів, а саме на ієрархічній архітектурі всіх масштабів, був вперше запропонований в PbTe, що призвело до найвищого значення ZT за рахунок зниження теплопровідності. Атом легуючої домішки вводить електронний стан в PbTe, яке змінює електронну щільність станів і збільшує коефіцієнт Зеебека від ~ 220 мкВ/К в нелегованому PbTe до ~ 290 мкВ/К в легovanому PbTe при 427 °C [71]. Легування більш ніж одним елементом термоелектричних матеріалах збільшує коефіцієнт потужності до 16.66 мкВт/см $\cdot$ К 2 , теплопровідність до 1.8 Вт/мК, а ZT (0.27) досягається, як у випадку Pb 0.91 Cr 0.009Te, спільно легovanого йодом, при 300 K.

Продуктивність PbTe, легovanого 2 % Na p-типу, при зміні високого тиску (HP), при якому тиск змінюється від 70 до 130 МПа, а час спікання становить від 0.5 до 2 годин, призводить до значення ZT 0.077 та коефіцієнта потужності 9.61 мкВт/см К 2 .

Сильне легування $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$ призводить до значного виродження долин за рахунок злиття зон провідності [72, 73]. Наноструктурування призводить до великого коефіцієнта Зеебека у PbTe . Канаидис та ін представили складну систему з формулою MQ-AB, що складається з диспергованих нанорозмірних включень зі структурою кристала типу кам'яної солі. Сонохімічний метод використовувався для синтезу наночастин PbTe , покритих PbSe , які покращили властивості Te , такі як коефіцієнт Зеебека 546 мкВ, що в 5–10 разів більше, ніж у непокритого чистого PbTe , завдяки зниженню теплової швидкості через підвищене розсіювання фононів на межі розділу PbTe (Sengupta та ін.). Наночастини PbTe на основі свинцю мають більш високі термоелектричні властивості, такі як більше значення ZT , ніж наночастини на основі телуру [74].

Нанокристалічний високоентропійний сплав PbSnTeSe має хороші термоелектричні властивості р-типу.[75] Наноструктурована серія р-типу $\text{PbSb}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.1, 0.3, 0.5$) формується методом високоенергетичного кульового подрібнення та гарячого пресування.[76] Монокристал $\text{Pb}_{0.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}<\text{Pb}>$ формується методом Бріджмена [77]. Різна концентрація легуваного Pb у наночастинках $\text{Te}_{10-x}\text{As}_x\text{Te}_6$ синтезується методом твердофазної реакції, що призводить до зниження електропровідності завдяки наночастинкам, збільшенню коефіцієнта потужності та коефіцієнту Зеебека. Телурид свинцю (PbTe), вирощений методом Чохральського, що призводить до зниження коефіцієнта Зеебека від 400 мкВ/К при 450 К до 0 мкВ/К при 550 К вказує на р-тип, а після підвищення температури 550К коефіцієнт Зеебека складає -110 мкВ /К, що свідчить про n-тип термоелектрики [78].

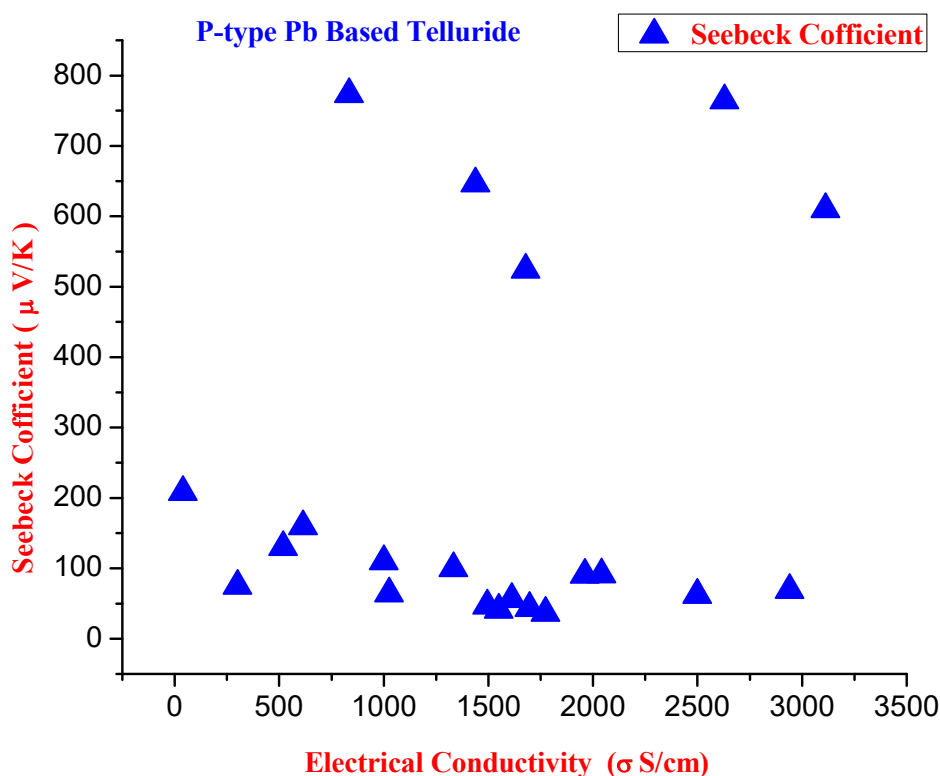


Рис. 2.2. Графік залежності S від σ різних ТЕТ Р-типу на основі Pb

Таблиця 2

Фізичні та термоелектричні властивості низькотемпературного
 телуриду P-типу на основі Pb

	Матеріал	S, $\mu\text{V/K}$	σ , S/cm	κ , W/mK	ZT	T, K	Пос.	Рік
1	$\text{Ti}_{0.02}\text{Pb}_{0.98}\text{Te}$	130	520	1.8	0.147	300K	71	2008
2	$\text{PbTe}_{0.75}\text{Se}_{0.25}+2\%\text{Na}$ doped	56	1612	2.7	0.056	300K	72	2011
3	PbTe : Na (2%)	62	2500	3.7	0.077	300K	72	2011
4	$\text{Na}_{0.02}\text{Mg}_{0.03}\text{Pb}_{0.95}\text{Te}$ 2% Na doped	110	1000	2.6	0.14	300K	73	2011
5	$\text{Pb}_{0.96}\text{Mn}_{0.04}\text{Te}$:Na	100	1333	2.2	0.2	300K	79	2012
6	$\text{Pb}_{0.98}\text{Na}_{0.02}\text{Te}$ -8%SrTe	91	2041	1.7*	0.18	300K	80	2016
7	$\text{Pb}_{0.953}\text{Na}_{0.04}\text{Ge}_{0.007}\text{Te}$	69	2941	2.15*	0.1	300K	81	2018
8	PbSnTeSe	159.66 (623k)	613.810 4	1.18*	.47 (623k)	373K	75	2021
9	$\text{PbSb}_{0.1}\text{Te}_{0.9}$	610	3112.7	1.52	0.12	0.09	76	2021
10	$\text{PbSb}_{0.1}\text{Te}_{0.9}$	523.9	1678.5	1.4			76	2021
11	$\text{PbSb}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$	764.20	2628.4	1.5	0.15	160K	76	2021
12	$\text{PbSb}_{0.3}\text{Te}_{0.7}$	646.46	1438.0	1.25	0.11	300K	76	2021
13	$\text{PbSb}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$	90.84	1961.1	1.42	0.16	160K	76	2021
14	$\text{PbSb}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$	773.10	833.6	1.05	0.13	300K	76	2021
15	PbTe	400(450K)		1.43	0.41	300K	78	2022
16	PbTe	424			0.70	300K	79	2023
17	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .0% hyper stoichiometric Pb	36.7	1772.6	2.55	0.09	300K	77	2023
18	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .01% hyper stoichiometric Pb	41.1	1549.8	2.25	0.12	300K	77	2023
19	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .05% hyper stoichiometric Pb	43.6	1696	2.21	0.15	300K	77	2023
20	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .1% hyper stoichiometric Pb	46.8	1494.9	2.30	0.14	300K	77	2023
21	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .5% hyper stoichiometric Pb	64.2	1026.3	2.08	0.20	300K	77	2023
22	$\text{Pb}_{.75}\text{Sn}_{0.25}\text{Te}$ at .1% hyper stoichiometric Pb	74.9	301.3	1.88	0.09	300K	77	2023
23	$\text{Sn}_{0.94}\text{Na}_{0.03}\text{Pb}_{0.03}\text{S}_{0.97}\text{Te}_{0.03}$	208	40	0.3 (525K)	0.38 (525K)	300K	82	2024

2.3. Низькотемпературні телуридні ТЕ матеріали р-типу на основі Ag

Ag₂Te, AgCuTe є надпровідниками при кімнатній температурі, а AgCuTe і Ag₂Te мають гексагональну і моноклінну структуру при високих температурах і мають надпровідність, що призводить до надвисокої електропровідності, роблячи їх корисними в термоелектричних пристроях. Легування Se в AgCuTe ефективно пригнічує катіонні вакансії завдяки міцнішому зв'язку AgSe/CuSe порівняно зі зв'язками AgTe/CuTe, що призводить до зниження теплопровідності та збільшення ZT у легуваному Se AgCuTe [83/170]. Легування Sn використовується для високої концентрації дірок Cu₂Te і призводить до збільшення ZT [84]. Потрійний полікристалічний AgSbTe₂ демонструє виняткові характеристики при низькотемпературному застосуванні термоелектричних пристроях; вплив різних легуючих домішок та складу на термоелектричні властивості підсумовано у таблиці; PF збільшується завдяки легуванню Se у матеріалі AgSbTe₂ [85]. Невпорядкована структура AgSbTe₂ відіграє важливу роль у зниженні [86].

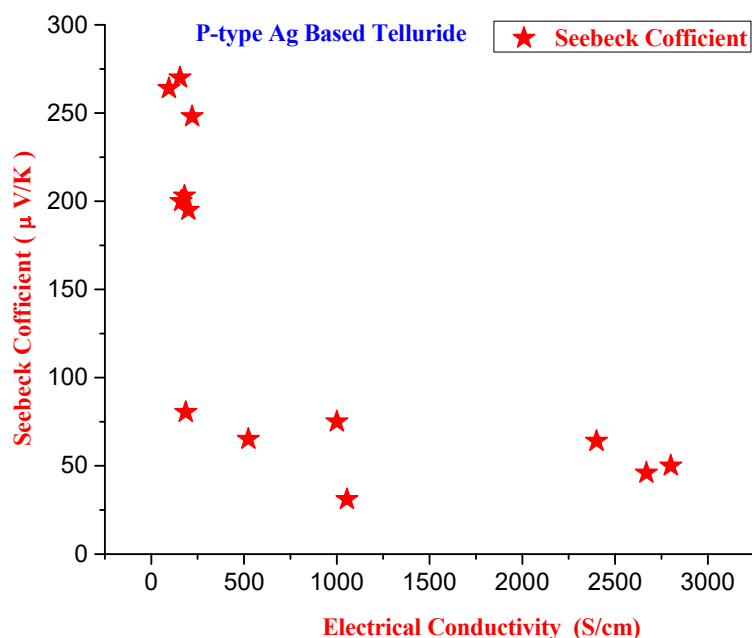


Рис. 2.3. Графік залежності коефіцієнта (S) від електропровідності (σ) різних TET P-типу на основі Ag

Додавання атомів Sn до LASTT призводить до створення р-типу матеріалів, відомих як LASTT, які є AgPb_mSn_nSbTe_{2+m+n}. Їх транспортні властивості змінюються залежно від співвідношення Pb : Sn і впливу різних легуючих елементів, сумованих у таблиці. Термоелектричні властивості LASTT (AgPb_mSn_nSbTe_{2+m+n}) залежать від перенесення заряду та фонів в AgSbTe [87]. Після легування Ag та додавання невеликої кількості Se був отриманий зразок Te_{0.94}Se_{0.03}Ag_{0.02}Sb_{0.01} шляхом механічного легування у поєднанні з SPS, що призводить до посилення розсіювання на межах зерен, зниження теплопровідності ґратки та підвищення коефіцієнта потужності [88]. Одномірні нанодропи халькогенідів металів Ag₂Te підходять для струминного друку без будь-яких добавок для гарного гнучкого термоелектричного застосування [89]. Регулювання вмісту

Te AgCuTe призвело до появи значних дефектів, які збільшують розсіювання фононів, знижують теплопровідність решітки більш ніж на 30% і також збільшують ZT [90].

Таблиця 3

Фізичні та термоелектричні властивості низькотемпературного телуриду N-типу на основі Ag

	Матеріал	S μV/K	σ S/cm	κ W/mK	ZT	T K	Пос.	Рік
1	AgSbTe ₂	264	95	0.5	0.4	300K	86	2008
2	Ag _{0.88} Sb _{1.04} Te ₂	200	161	0.73	0.26	300K	86	2008
3	Ag _{0.83} Sb _{1.06} Te ₂	195	200	0.7	0.32	300K	86	2008
4	AgSbSe _{0.02} Te _{1.98}	270	155	0.58	0.58	300K	85	2010
5	Ag _{0.5} Pb ₆ Sn ₂ Sb _{0.2} Te ₁₀	75	1000	1.4	0.12	300K	85	2010
6	AgSn _m SbTe _{m+2} (m=5)	64	2400	2.18	0.13	300K	87	2012
7	AgSn _m SbTe _{m+2} (m=10)	50	2800	3	0.07	300K	87	2012
8	AgSbTe _{1.85} Se _{0.15}	203	179	0.37*	0.53	300K	91	2017
9	AgCuTe	31	1055	0.35*	0.15	300K	83	2018
10	Sn _{0.83} Ag _{0.03} Mn _{0.17} Te	46	2669	1.64*	0.05	320K	82	2020
11	AgSb _{0.94} Cd _{0.06} Te ₂	248	220	0.15*	1.5	300K	92	2021
12	Te _{0.94} Se _{0.03} Ag _{0.02} Sb _{0.01}	220		1.38	.57 (ave)	300K	88	2022
13	Ag _{1.9} Te	80.4	185.8				89	2023
14	Ag _{2.1} Te	65.2	523.3				89	2023
15	AgCuTe _{0.925}	63		0.5 (300K)	1.02 (573K)	320K	90	2024

2.4. Низькотемпературні телуридні TE матеріали р-типу на основі Sn

SnTe є кристалічною кубічною структурою типу кам'яної солі при кімнатній температурі, яка є напівпровідником з вузькою забороненою зоною, в результаті чого заборонена зона має високу симетрію, вироджені електронні смуги і легко змінює електронну структуру при легуванні і додаванні домішок. Допування є дуже ефективним для створення резонансних рівнів у SnTe [93]. SnTe має структуру кам'яної солі, велика ширина забороненої зони між первинною та вторинною валентними смугами SnTe призводить до малого коефіцієнта Зеєбека, що призводить до поганих термоелектричних

характеристик. Допування та легування зменшують ширину забороненої зони, що покращує термоелектричні характеристики, наприклад, спільне легування In та Cd у SnTe, а також In та Ag. Завдяки спільному легуванню Ag та Mn у SnTe також було досягнуто синергетичного ефекту. Основна проблема в SnTe – концентрація носіїв p-типу через катіонні вакансії, що зменшує концентрацію дірок за рахунок самокомпенсації в SnTe [94]. Крім того, нові стратегії спрямовані на інженерію фероелектричної нестабільності у SnTe для досягнення високих термоелектричних характеристик.

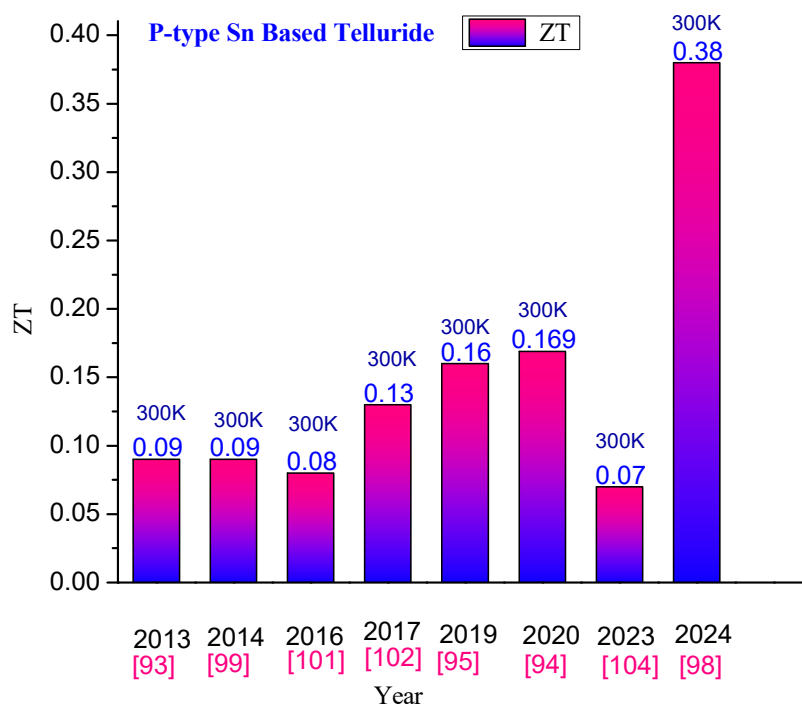


Рис. 2.4. ZT різних TET P-типу на основі Sn за різних температур і років

Вперше синтез чистого та легованого Sr SnTe з використанням методу термічного випаровування призводить до збільшення коефіцієнта Зеєбека завдяки додаванню Sr за рахунок локалізації носіїв заряду, зокрема енергетичної фільтрації. Об'ємний телурид олова (SnTe) синтезується методом плавлення в полум'ї, а двовимірний SnTe отримують методом рідкофазної ексfolіації. Експериментальні результати показують високе значення $ZT \sim 0.17$ через низьку теплопровідність двовимірного SnTe порівняно з об'ємним SnTe, $ZT \sim 0.005$ при кімнатній температурі [96]. Колоїдний метод гарячої інжекції виготовлення бінарного SnTe [97]. Легування та інженерія деформації кристалічної решітки призводять до зниження теплопровідності за рахунок розсіювання фононів та порушення теплопровідності. У легованому зразку Te зберігається стабільний коефіцієнт потужності від 1.8 до 2.25 мкВт/см $\cdot$ К 2 у широкому діапазоні температур від 300 до 573 K, а коефіцієнт Зеєбека становить від 208 мкВ/К при 300 до 350 мкВ/К при 573 K. The cationic Na, Pb and anionic Te doped sample result low thermal conductivity 0.3W/mK at 525K and result ZT of 0.38 [98]. Високий коефіцієнт потужності досягається для тонкої плівки Sn $_{0.7}$ Sr $_{0.3}$ Te при різних температурах наступного відпалу з використанням простого термічного випаровування. Наночастинки олова (Sn) та

шаруваті частинки паладію (Pd), отримані на нанопластинках Bi_2Te_3 методом електродного осадження, демонструють низьку теплопровідність 1.1 Вт/мК, оскільки форма наночастинок полегшує розсіювання фононів.

Таблиця 4

Фізичні та термоелектричні властивості низькотемпературного телуриду P-типу на основі Sn

	Матеріал	S $\mu\text{V}/\text{K}$	σ S/cm	κ W/mK	ZT	T K	Пос.	Рік
1	$\text{Sn}_{0.9975}\text{In}_{0.0025}\text{Te}$	50	4300	1.61*	0.09	300K	93	2013
2	$\text{Sn}_{0.985}\text{In}_{0.015}\text{Te}_{0.85}\text{Se}_{0.15}$	66	1674	1.28*	0.09	300K	99	2014
3	$\text{Sn}_{0.94}\text{Mg}_{0.09}\text{Te}$	35	3126	2.72*		300K	100	2015
4	$\text{Sn}_{0.94}\text{Ca}_{0.09}\text{Te}$	44	5466	1*	0.8	300K	101	2016
5	$\text{Sn}_{0.915}\text{Mn}_{0.11}\text{In}_{0.005}\text{Te}$	117	634	1.64*	0.13	300K	102	2017
6	$\text{Sn}_{0.57}\text{Sb}_{0.13}\text{Ge}_{0.3}\text{Te}$	67	2004	0.48**	0.16	300K	95	2019
7	$\text{Sn}_{0.83}\text{Ag}_{0.03}\text{Mn}_{0.17}\text{Te}$	46	2669	1.64*	0.05	300K	94	2020
8	$\text{Sn}_{1.03}\text{Te}_{0.85}\text{Se}_{0.075}\text{S}_{0.075}\text{-2\%Ag-2\%In}$	90	1387	1.21*	0.1694	300K	94	2020
9	SnTe	30	2.1×10^4			300K	97	2021
10	$(\text{SnGe}_{0.03}\text{Te})_{0.9}(\text{Ag}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{Se})_{0.1}$	68			0.89 (873K)	300K	103	2022
11	$\text{AgSn}_4(\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Te}_6$	40	1429	108		300K	104	2023
12	$\text{AgSn}_2(\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Te}_{3.97}\text{Br}_{0.03}$	74	685	1.2		300K	104	2023
13	$\text{AgSn}_4(\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})\text{Te}_{5.97}\text{Br}_{0.03}$	57	1443	2.0	0.07	300K	104	2023
14	SnTe 2D nanostructured	280			0.17	300K	96	2024
15	$\text{Sn}_{0.94}\text{Na}_{0.03}\text{Pb}_{0.03}\text{S}_{0.97}\text{Te}_{0.03}$	208		.3 (525K)	.38 (525K)	300K	98	2024

2.5. Низькотемпературні телуридні ТЕ матеріали р-типу на основі Cu: Cu_2Te – це телурид на основі перехідного металу, надіонний провідник, який забезпечує високу електропровідність. Легуюча домішка Cu збільшує концентрацію носіїв заряду, що призводить до високого ZT. Легування Sn використовується для збільшення концентрації великих дірок у Cu_2Te [105]. Споріднені з Cu телуриди CuGaTe_2 та CuInTe_2 мають високі значення σ та S , таким чином знижуючи σ через включення та точкові дефекти, включення нанофази в Cu_2Se у CuGaTe_2 , що знижує теплопровідність, нанорозмірні гетероструктури ZnS [106] та нановключення In_2O_3 [107] були включені в CuInTe_2 для зниження κ . Легування AgIn у CuInTe_2 знижує κ за рахунок утворення слабкого зв'язку Ag-Te [108], багатокомпонентне легування Ag та In у CuGaTe_2 також знижує теплопровідність решітки та збільшує ZT. Розупорядкування атомів Cu зі збільшенням вмісту S (сірки) призводить до більш сильного розсіювання фононів у зразку $\text{Cu}_2\text{Te}_{0.2}\text{S}_{0.8}$ та знижує теплопровідність [109]. Легування матеріалу Se та Te цинком призводить до зниження концентрації носіїв заряду та електропровідності [110]. Тонка плівка телуриду міді зі співвідношенням Cu:Te 1:1 забезпечує найвищий коефіцієнт потужності завдяки фільтрації носіїв на межі розділу між двома фазами [111]. Метод кульового помелу, який використовувався для синтезу нанокompозитного зразка $\text{Cu}_7\text{Te}_4/\text{Sb}_2\text{Te}_3$, легovanого Bi, забезпечує високий коефіцієнт потужності 788.28 Вт/м K^2 при 310 K.

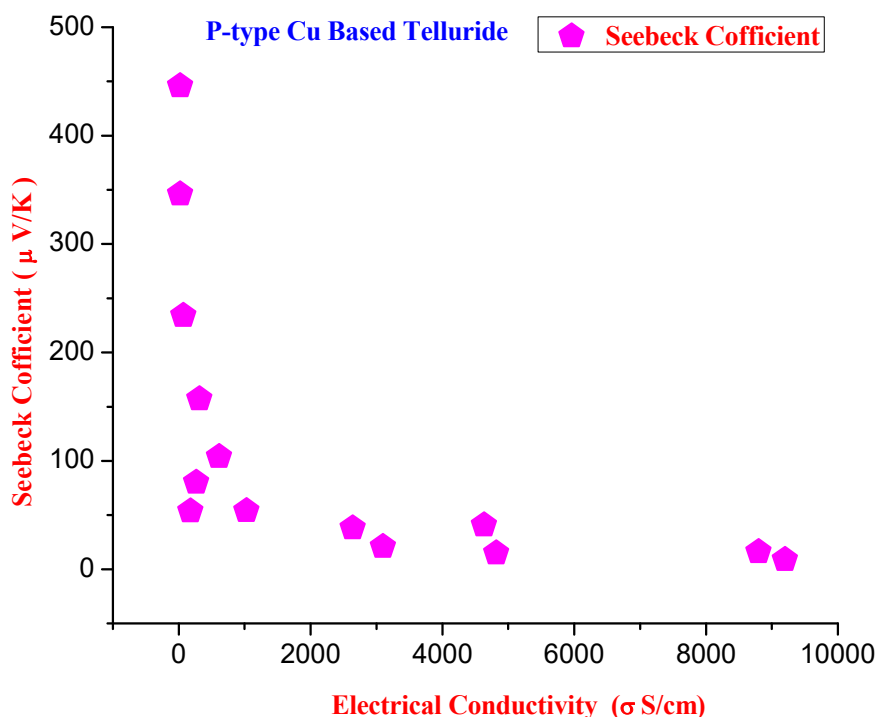


Рис. 2.5. Графік залежності S від σ різних ТЕТ Р-типу на основі Cu

Таблиця 5

Фізичні та термоелектричні властивості низькотемпературного
 телуриду P-типу на основі Cu

	Матеріал	S μV/K	σ S/cm	κ W/mK	ZT	T K	Пос.	Рік
1	Cu _{0.75} Ag _{0.2} InTe ₂	234	69	1.86	0.07	300K	112	2014
2	CuInTe _{1.99} Sb _{0.01} +1 %ZnO	104	610	3.6*		300K	107	2016
3	CuInTe ₂ +6%ZnS	157	312	3.54*		300K	106	2017
4	Cu _{1.9} Sn _{0.1} Te	38	2638	1.22	0.1	320K	105	2018
5	Cu ₂ Te	15	4818	6.1		320K	105	2018
6	Cu _{0.89} Ag _{0.2} In _{0.91} Te ₂	446	19	2.68		300K	108	2020
7	Cu ₄ ZnSn ₂ Se ₇	80	265	3.0	.20 (630K)	300K	110	2021
8	Cu ₄ ZnSn ₂ Te ₇	21	3100	4.6	.05 (575K)	300K	110	2021
9	Cu ₅ Sn ₂ Se ₇	16	8800	6.7	.10 (630K)	300K	110	2021
10	Cu ₅ Sn ₂ Te ₇	9	9200	10	.009 (575K)	300K	110	2021
11	Cu _{0.5} Te	346	20.74			300K	111	2022
12	CuTe	40.8	4632			300K	111	2022
13	Cu ₂ Te	53.8	178.71			300K	111	2022
14	Cu ₂ Te _{0.2} S _{0.8}	338		.29		300K	109	2023
15	5at%Cu- Bi ₂ Te ₃ (brain ice sol)	155		1.396	0.17	300K	113	2024

3. Методології синтезу ТЕ матеріалів

3.1. Легування методом росту розплаву (MG)

Масивні термоелектричні матеріали отримують шляхом змішування більше одного елемента в бажаному стехіометричному співвідношенні, після чого герметичні ампули кварцові нагрівають при температурі 500–2000 °С. Після плавлення та нагріву бажану структуру отримують шляхом відпалу, обробки під високим тиском (HP) або іскрового

плазмового спікання (SPS) тощо. Температура обробки змінюється для матеріалів після легування або формування сплавів, таких як PbTe, Bi₂Te₃ тощо.

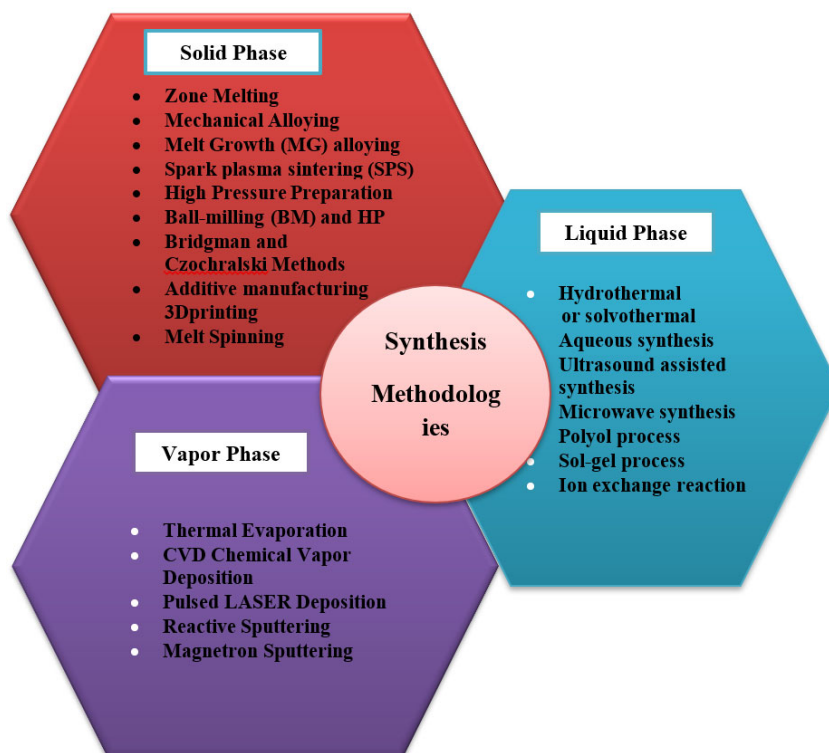


Рис. 3.1. Різні методології синтезу

3.2. Механічне легування

Механічне легування зазвичай використовується для отримання нано/мікроструктурних термоелектричних матеріалів зі зниженою теплопровідністю. У цьому методі порошок елемента змішують у точному співвідношенні та подрібнюють у кульовому млині, а потім обробляють методом високого тиску або іскрового плазмового спікання (SPS). Cu₂Se утворюється кульовим млином та методом високого тиску [114].

3.3. Зонне плавлення

Зонне плавлення дозволяє безпосередньо готувати об'ємні полікристалічні матеріали без подальшого спікання, що запобігає їх неоднорідності та випаровуванню за високих температур.

3.4. Методи Бріджмена та Чохральського

Обидва методи використовуються для синтезу монокристалічних матеріалів прямим затвердінням шляхом перетворення розплаву з гарячої зони в холодну зону, таких як Ba₈Au_{5.33}Ge_{40.67} за допомогою процесу Бріджмена з SPS. Метод Чохральського використовується для вискоєфективного та високочистого отримання монокристалічних матеріалів.

3.5. Приготування під високим тиском

Метод приготування під високим тиском (ГПа-5 ГПа) використовується для запобігання втратам леткої сировини через сублімацію шляхом зниження температури реакції та скорочення її тривалості.

3.6. Адитивне виробництво (3D-друк)

Адитивне виробництво може бути використане для конструювання складної геометрії та шаруватих структур. Адитивне виробництво включає фотополімеризацію, наплавлення порошкового шару, методи струменевого нанесення матеріалів та методи на основі екструзії.

3.7. Дугове плавлення або левітація

Дугове плавлення або левітація – це процес миттєвого плавлення для отримання легованої системи, такої як сплав Hf, інтерметалідний та високотемпературний матеріал, з подальшою обробкою SPS або HP, такий як $\text{Hf}_{1-x}\text{Zr}_x\text{Ni}_{1-y}\text{Sn}_y\text{Sb}_y$, утворений шляхом левітації та SPS.

3.8. Іскрове плазмове спікання ‘SPS’

Іскрове плазмове спікання має видатну перевагу в досягненні високого ущільнення за короткий час з обмеженим ростом зерен. SPS використовує дуже великий струм, що проходить через зразок, для його безпосереднього нагрівання, як у випадку TE матеріалу $\text{Cu}_{15}\text{As}_{30}\text{Te}_{55}$, $\text{Ge}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Te}$

3.9. Метод кульового подрібнення (BM) та гарячого пресування (HP)

Метод HP використовується для розробки термоелектричних матеріалів на основі PbSe та SiGe. Комбінація кульового подрібнення та HP є потужним методом отримання об'ємних термоелектричних матеріалів, таких як аморфні щільні об'ємні матеріали $80\text{GeTe}_{2-20}\text{Ga}_2\text{Te}_3$, отримані при кімнатній температурі, з дрібнозернистою мікроструктурою та високою електропровідністю.

3.10. Метод спінінгу розплаву (MS)

Спінінг розплаву є корисним методом для швидкого охолодження розплавленого розчину. При цьому тонкий струмінь розплавленого скла тече по обертовому колесу, і тепло плавлення швидко передається колесу з подальшим обертанням, що створює мікроструктуру зі зниженою теплопровідністю. Goncalves та ін. отримали $\text{Cu}_{30}\text{As}_{15}\text{Te}_{55}$ за допомогою методу MS.

3.11. Гідротермальний або сольвотермічний методи

Наразі матеріали з нанорозмірами, такі як нанотрубки, наночастинки, нанокоробки, порожнисті наносфери та нанодендрити, отримують гідротермальним та сольвотермічним методами. Синтез починається у водному/неводному розчині в закритих автоклавах з нержавіючої сталі при високій температурі та тиску, наприклад, нанопорошок PbTe та Bi_2Te_3 .

3.12. Водний синтез

Водний синтез використовується для великомасштабного виробництва TE матеріалу при кімнатній температурі та атмосферному тиску, такого як сірий порошок PbTe, який отримують цим методом.

3.13. Мікрохвильовий синтез

Мікрохвильовий синтез можливий у розчині завдяки тертю та зіткненню між полярними молекулами під дією змінного електромагнітного поля. У твердотільному мікрохвильовому випромінюванні прекурсором є вакуумно запаяна кварцова ампула, яка піддається впливу мікрохвильового випромінювання в мікрохвильовій печі.

3.14. Поліольний процес

Поліольний процес використовується для отримання PbTe , Bi_2Te_3 та Cu_7Te_5 за допомогою мікрохвильового опромінення. Вибраний прекурсор (ацетат Pb , Ni , Cu тощо) розчиняється в етиленгліколі (EG), до якого додається елементарний порошок Te . Під дією мікрохвильового опромінення відбувається твердофазна реакція з утворенням нанокристалічної форми.

3.15. Золь-гель метод

Для отримання оксидів металів, халькогенідів та напівпровідників золь-гель метод є універсальною технікою, такою як утворення Bi_2Te_3 за допомогою золь-гель методу.

3.16. Синтез за допомогою ультразвуку

У сонохімічному синтезі неорганічні частинки утворюються внаслідок хімічної реакції під впливом сильного ультразвукового випромінювання в діапазоні частот від 20 кГц до 15 кГц.

3.17. Реакція іонного обміну

Реакція іонного обміну здебільшого використовується для синтезу напівпровідникових нанокристалів, де катіони-гостьові заміщуються катіонами атомів-господарів у кристалічній решітці, таких як тонка плівка Ag_2Se .

3.18. Метод хімічного осадження з парової фази ‘CVD’

Метод хімічного осадження з парової фази (CVD) використовується виготовлення тонких плівок з парової фази шляхом реакції летких прекурсорів на поверхні підкладки, наприклад, при вирощуванні масивів нанодротів в TE мікрогенераторах.

3.19. Термічне випаровування

Термічне випаровування використовується для виготовлення тонкої плівки Ag_2Se змінної товщини шляхом застосування джерела тепла для випаровування об'ємного полікристалічного Ag_2Se .

3.20. Імпульсне ЛАЗЕРНЕ осадження

Імпульсне ЛАЗЕРНЕ осадження виконується шляхом фокусування високоенергетичного імпульсного променя на твердому матеріалі мішені. Цей метод використовується для неепітаксialного вирощування TE-плівок із заданою фазою та складом.

3.21. Реактивне розпилення

Реактивне розпилення, при якому складні плівки виготовляються на підкладках шляхом введення реактивного газу-попередника.

3.22. Магнетронне розпилення

Магнетронне розпилення, при якому магнітно обмежена плазма стикається з електродом або мішенню, щоб викинути атом для виготовлення на підкладку, також

використовується для серії дуже хороших експлуатаційних ТЕ плівок за кімнатної температури для застосування, такого як носимі пристрої.

4. Передові стратегії для підвищення експлуатаційних характеристик термоелектричних матеріалів

Для проектування передових термоелектричних матеріалів використовуються різні стратегії, такі як

4.1. Допування та спільне допування

Різні допуючі елементи використовуються як легувальні домішки для покращення характеристик ТЕ завдяки різним механізмам. Як правило, коефіцієнт Зеебека безпосередньо пов'язаний з концентрацією n , ефективною масою m^* та T , тому концентрація є важливим фактором для встановлення пікової температури та максимального коефіцієнта потужності. Відповідний допуючий елемент може підвищити концентрацію носіїв заряду, змінюючи структуру електронних зон, а також збільшуючи кількість густин станів, і рівень Фермі зміщується поблизу зони провідності, що сприяє транспорту електронів, збільшуючи S , ZT та електропровідність. Таким чином, легування покращує характеристики ТЕ матеріалів. Рівномірне допування зменшує рухливість носіїв, а сильно допований напівпровідник демонструє високий коефіцієнт потужності.

Злиття валентної зони та зони провідності призводить до одночасного збільшення коефіцієнта потужності, S та електропровідності. Через легування електронна зона сходиться в об'ємному матеріалі з високим рівнем виродження в долині. Електронна зона в $\text{PbTe}_{1-x}\text{Se}_x$, легуваному 2% Na, сходиться, збільшує ширину електронної зони та виродження в долині, і в результаті цього механізму отримується $ZT = 1.8$ при 527°C [115]. Як σ , так і S збільшуються одночасно в напівпровіднику-основі, вбудованому в антирезонансні наночастинки. Якщо ширина забороненої зони значно більша за $k_B T$ ($E_g > 10 k_B T$), то ширина забороненої зони та рівень Фермі поблизу зони провідності призводять до значного збільшення термоЕРС матеріалу, і концентрація носіїв заряду та перенос заряду не відіграють жодної ролі. Наприклад, у PbTe максимальне ZT досягається при 327°C ($E_g \sim 0.36 \text{ eV}$).

Для збільшення термоелектричної потужності та одночасного зменшення κ шляхом відповідного допування елементами, що створюють флуктуації маси і більш складну зонну структуру, що призводить до неупорядкованого розсіювання фононів, яке зменшує κ (зневажливо мале у разі електронів через їх велику швидкість і більше) та покращує термоелектричні характеристики. Збільшення термоелектричної потужності відбувається завдяки ефекту енергетичної фільтрації в однорідному матеріалі. На межі розділу зерен носіїв заряду стикається з потенційним бар'єром, який перетинає цей бар'єр, що призводить до більш сильного нерівноважного розподілу енергії з частинками високої енергії, і в результаті цього збільшується S , оскільки носії з низькою енергією і більш високою енергією Фермі компенсують один одного, тим самим збільшуючи термоелектричну потужність.

Допування полікристалічного SnSe елементами (Li, K та Na) покращує характеристики термоелектричного матеріалу, а ZT збільшується, оскільки легуючі домішки підвищують електропровідність та концентрацію носіїв заряду. Матеріал на основі PbTe N-типу демонструє чудові термоелектричні властивості завдяки допуванню нанотрубок PbTe вісмутом та найвищому значенню ZT. Вперше значення ZT перевищує 2. Відмінні результати були отримані при допуванні PbTe_{0.7} S_{0.3} калієм, що призвело до значення ZT 2.2 при 923 K [116].

4.2. Легування

Легуючі елементи змінюють властивості термоелектричних матеріалів, що призводить до збільшення коефіцієнта потужності (PF) та зменшення ν , що особливо помітно в сплавах НН, скуттерудитах та клатратах. У сплавах НН електронна структура змінюється через легування елементами, що створює атомний безлад на атомному рівні внаслідок розвитку атомних флуктуацій або ефект деформації, що знижує κ_L . Низьке значення κ , що досягається в рамках одного матеріалу, може контролюватись за допомогою таких стратегій, як фононний скляний електронний кристал (PGEC), особливо в скуттерудитах, де атом-домішка в матриці складної матеріальної системи діє як центр розсіювання, що призводить до зменшення κ і покращення термоелектричних характеристик.

4.3. Наноструктурування

Зменшення структурних розмірів ТЕ матеріалів до наномасштабного діапазону шляхом наноструктурування для покращення ZT. Наноструктурування зменшує теплопровідність шляхом розсіювання фононів від поверхні наноструктури або межі розділу, ефективного в нанодротах, квантовій точці, надгратці наночастинок та нанотонкоплівковій системі. Наявність межі розділу в наноструктурованому матеріалі призводить до зниження теплопровідності решітки та збільшення ZT, наприклад, нанокристалічний матеріал, отриманий методом ВМ, показує ZT $\sim 1,4$ при 127°C [117]. Вплив відпалу збільшує наноскопічні однорідності всередині зерна, що призводить до збільшення розсіювання фононів та зменшення значення ρ [117]. Наноструктурування не може впливати на коефіцієнт потужності.

Наноструктуровані матеріали, такі як 2D ТЕ наноматеріал (квантові ями), 1D ТЕ матеріал (нанодроти, нанотрубки, нанострічки та наносітки), 0D квантова точка – всі ці 2D, 1D, 0D, які називаються LD, що використовуються для нових ТЕ пристроїв, неструктурування яких може збільшити електронну густину стану поблизу рівня Фермі за допомогою квантового обмеження завдяки цьому значенню ZT у деяких наноструктурах вище 3N типу сполуки Bi₂(Te, Se)₃ у формі нанодроту за допомогою методу термічного спільного випаровування, що дає ZT ~ 1.01 при 300 K [118].

4.4. Нанокompозити

Нанокompозитні матеріали та нанокompозитні стратегії широко використовуються в ТЕ пристроях завдяки значним перевагам у порівнянні з об'ємними та наноструктурованими матеріалами, які контролюють фононний та електронний транспорт, такими як сплав НН, скуттерудити та система Si-Ge. Флуктуації складу на

нанорівні, спричинені спінодальною декомпозицією в обох складових змішаної фазової системи, мають однакову решітку, що призводить до просторової модуляції локального складу на нанорівні. Ця просторова модуляція когерентно встановлюється у вбудованих наночастинках у матриці, формуючи наноструктурований ТЕ матеріал. Нанокомпозит PbS-Ag утворює омичний контакт з об'ємним напівпровідником, покращуючи ТЕ властивості з покращенням $ZT \sim 1.7$ при 850 K [14].

4.5. Нановключення

Нановключення використовуються через їх низьку вартість та простоту обробки. Дисперговані вторинні нановключення у матеріалі-носія наноструктури називаються наночастинками. Наночастинки найефективніші завдяки зменшенню κ_L за рахунок розсіювання фононів на наночастинках. Наночастинки важливі збільшення термоелектричної потужності, оскільки розсіювання фононів чи електронів на гетерокордонах призводить до збільшення термоелектричної потужності з -155 до -177 мкВ/К зі збільшенням вмісту частинок ZrO_2 від 0 до 9 об.%. Наночастинки знижують теплопровідність, збільшують електропровідність та S.

4.6. Надгратка

Періодичний шар товщиною два або більше нанометрів називається надграткою. Його гомоструктура (виготовлена з одного матеріалу) та гетероструктура (виготовлена з двох або більше матеріалів) синтезуються молекулярно-променевим епітаксійним розпиленням, металоорганічним CVD тощо. Ультратонкі плівкові наноструктури виготовляються термічним випаровуванням, електроосадженням, імпульсним лазерним осадженням, CVD тощо.



Рис. 4.1. Передові стратегії для підвищення продуктивності термоелектричних матеріалів

QDSL означає квантову точкову надгратку, що складається з $PbTe/PbSe_{0.98}Te_{0.02}$, легованих Ві на підкладці BaF_2 зі значенням ZT 1.6 та 3.5 при 300K та 570K. Виготовлення багатоквантової надгратки Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 з $ZT \sim 2.4$ без зміни коефіцієнта потужності. 2D супергратка, що складається з квантових стінок $PbTe$ та бар'єру $Pb_{1-x}Eu_xTe$, що значно покращує характеристики ТЕ. Різні надгратки, в яких

характеристики ТЕ покращуються завдяки зменшенню теплопровідності, наприклад, PbTe/PbSe, Ge/SiGe, Si/Ge, Bi/Sb та Bi₂Te₃/Sb₃Te₃ [119]. Вперше ідею надгратки запропонував Venkatasubramanian для покращення значення ZT шляхом зменшення κ_L у випадку надгратки Bi₂Te₃/Sb₃Te₃ p-типу шляхом контролю передачі фононів та електронів у надгратці, що призвело до високого значення ZT 2.4.

5. Висновки та майбутні перспективи

На основі порівняльного аналізу, представленого в цьому огляді, розробка термоелектричних (ТЕ) матеріалів значно просунулася, з такими помітними досягненнями, як відкриття та оптимізація телуридів на основі Sn. Сполуки, такі як Pb_{1-x}Sn_xTe, продемонстрували високу ефективність як у n-, так і в p-типових конфігураціях у широких температурних діапазонах, що підкреслює їхню важливість у застосуваннях ТЕ при середніх температурах. Тим не менш, стабілізація носіїв p-типу в халькогенідних системах залишається проблемою, що обмежує широке використання високопродуктивних пристроїв.

Для наочності, ТЕ-матеріали можна класифікувати за діапазонами робочих температур:

Температурний діапазон (K)	Матеріали n-типу	Матеріали p-типу
300–600 (Низький)	Bi ₂ Te ₃	Bi ₂ Te ₃
600–900 (Середній)	Сполуки на основі PbTe	Сполуки на основі GeTe

У цих температурних режимах оптимізація продуктивності спиралася на кілька стратегій, включаючи збіжність зон, дефектну інженерію, наноструктурування та дизайн сплавів. Хоча ці підходи призвели до поступових покращень, досягнення ZT > 2 у низькотемпературних матеріалах на основі халькогенідів залишається відкритим завданням. Вирішення цієї проблеми матиме вирішальне значення для забезпечення масштабованих ТЕ-пристроїв у холодильних та енергозберігаючих системах протягом наступного десятиліття.

Підсумовуючи, телуриди на основі Sn та системи PbTe/GeTe є важливими віхами в дослідженнях середньотемпературних термоелектронних матеріалів, але для подолання внутрішніх обмежень низькотемпературних матеріалів необхідні подальші інновації. Удосконалення як низькотемпературних, так і середньотемпературних термоелектронних матеріалів буде важливим для масштабованих енергетичних рішень, починаючи від охолодження і закінчуючи рекуперацією відхідного тепла, тим самим забезпечуючи вагомий внесок термоелектрики в технології сталого розвитку енергетики.

Конфлікт інтересів: Від імені всіх авторів, автор, яким ведеться листування, заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Інформація про авторів:

Shailendra Kumar Gupta – M.Sc. M.Phil., Research Scholar.
Pragma Agarwal – M.Sc. Ph.D., Professor.

Manoj Kumar – M.Sc. Ph.D., Professor.

Sudhir Kumar Sharma – M.Sc. Ph.D., Professor.

Suresh Kumar Sharma – M.Sc. M.Phil., Ph.D., Assistant Professor.

Література

- 1 Chu S and Majumdar A, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, *Nature*, 2012, 488: 294–303.
- 2 Zhang L, Shi X. L, Yang Y. L and Chen Z. G, Flexible thermoelectric materials and devices: From materials to applications, *Today* 46 (2021) 62–108. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.016>
- 3 Chen W.Y, Shi X.L, Zou J and Chen Z.G, Wearable fiber-based thermoelectrics from materials to applications, *Nano Energy* 81 (2021), 105684. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105684>
- 4 GMao J, Chen G, Ren Z, Thermoelectric cooling materials, *Nat. Mater.* 20 (2021) 454–461.
- 5 Jiang B, Yu Y, Cui J, Liu X, Xie L, Liao J, Zhang Q, Huang Y, Ning S, Jia B, Zhu B, Bai S, Chen L, Pennycook S.J and He J, High-entropy-stabilized chalcogenides with high thermoelectric performance, *Science* 371 (2021) 830. <https://doi.org/10.1126/science.abe1292>
- 6 Minnich AJ, Dresselhaus MS and Ren ZF, Bulk nanostructured thermoelectric materials: current research and future prospects, *Energy and Environmental Science*, 2009; 466–479 <https://doi.org/10.1039/B822664B>
- 7 Parashchuk, N. Sidorenko, M. Ivantsov, A. Sorokin, M. Maksymuk, B. Dzundza, Z. Dashevsky, Development of solid-state multi-stage thermoelectric cooler, *J. Power Sources*. 496, 229821 (2021) (ref. 48).
- 8 M. Maksymuk, B. Dzundza, O. Matkivsky, I. Horichok, R. Shneck, and Z. Dashevsky, “Development of the high performance thermoelectric unicouple based on Bi₂Te₃ compounds, *J. Power Sources* 530, 231301 (2022).
- 9 S. Mamykin, R. Shneck, B. Dzundza, F. Gao, Z. Dashevsky, Novel Solar System of Electricity and Heat, *Energies* 16, 3036 (2023)
- 10 S. Mamykin, B. Dzundza, R. Shneck, L. Vikhor, Z. Dashevsky, Development of Solar Energy Systems Based on High Performance Bulk and Film Thermoelectric Modules, *J. of Thermoelectricity*. N1, 61-79 (2025)
- 11 L. Su, D. Wang, S. Wang, B. Qin, Y. Wang, Y. Qin, Y. Jin, C. Chang and L.D. Zhao, High thermoelectric performance realized through manipulating layered phonon-electron decoupling, *Science* 375 (2022) 1385–1389 <https://doi.org/10.1126/science.abn8997>
- 12 Zhao K.P, Eikeland E, He D.S, Qiu W.J, Jin Z.C, Song Q.F, Wei T.R, Qiu P.F, Liu J.J, He J.Q, Iversen B.B, He J, Chen L.D and Shi X, Thermoelectric materials with crystal-amorphicity duality induced by large atomic size mismatch, *Joule* 5 (2021) 1183–1195. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.012>
- 13 Yang S, Gao Z, Qiu P, Liang J, Wei T.R, Deng T, Xiao J, Shi X and Chen L, Ductile Ag₂₀S₇Te₃ with Excellent Shape-Conformability and High Thermoelectric Performance *Adv. Mater.* 33 (2021). <https://doi.org/10.1002/adma.202007681>

- 14 He J and Tritt T.M, Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward, *Science* 357 (2017) 6358, eaak9997. <https://doi.org/10.1126/science.aak9997>
- 15 Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T and O'Quinn B, Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit *Nature* 413 (2001) 597–602.
- 16 Poudel B, Hao Q, Ma Y, Lan Y.C, Minnich A, Yu B, Yan X.A, Wang D.Z, Muto A, Vashaee D, Chen X.Y, Liu J.M, Dresselhaus M.S, Chen G and Ren Z.F, High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys, *Science* 320 (2008) 634–638. <https://doi.org/10.1126/science.1156446>
- 17 Nozariasbmarz A, Suarez F, Dycus J.H, Cabral M.J, LeBeau J.M, Öztürk M.C and Vashaee D, Thermoelectric generators for wearable body heat harvesting: Material and device concurrent optimization, *Nano Energy* 2020, 67, 104265. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104265>
- 18 Zong P.A, Hanus R, Dylla M, Tang Y, Liao J, Zhang Q, Snyder G.J and Chen L, Skutterudite with graphene-modified grain-boundary complexion enhances zT enabling high-efficiency thermoelectric device, *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 183–191. <https://doi.org/10.1039/C6EE02467J>
- 19 Nunna R, Qiu P, Yin M, Chen H, Hanus R, Song Q, Zhang T, Chou M.Y, Agne M.T, He J, Ultrahigh thermoelectric performance in Cu₂Se-based hybrid materials with highly dispersed molecular CNTs, *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 1928–1935. <https://doi.org/10.1039/C7EE01737E>
- 20 Olvera A, Moroz N, Sahoo P, Ren P, Bailey T, Page A, Uher C, Poudeu P, Partial indium solubility induces chemical stability and colossal thermoelectric figure of merit in Cu₂Se, *Energy Environ. Sci.* 2017, 10, 1668–1676. <https://doi.org/10.1039/C7EE01193H>
- 21 Zhao K, Zhu C, Qiu P, Blichfeld A.B, Eikeland E, Ren D, Iversen B.B, Xu F, Shi X, Chen L, High thermoelectric performance and low thermal conductivity in Cu₂-yS_{1/3}Se_{1/3}Te_{1/3} liquid-like materials with nanoscale mosaic structures, *Nano Energy* 2017, 42, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.10.042>
- 22 Li M, Cortie D.L, Liu J, Yu D, Islam S.M.K.N, Zhao L, Mitchell D.R, Mole R.A, Cortie M.B, Dou S, Ultra-high thermoelectric performance in graphene incorporated Cu₂Se: Role of mismatching phonon modes, *Nano Energy* 2018, 53, 993–1002. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.09.041>
- 23 Li M, Islam S.M.K.N, Yahyaoglu M, Pan D, Shi X, Chen L, Aydemir U, Wang X, Ultrahigh figure-of-merit of Cu₂Se incorporated with carbon coated boron nanoparticles, *InfoMat* 2019, 1, 108–115. <https://doi.org/10.1002/inf2.12006>
- 24 Zhao L.D, Lo S.H, Zhang Y, Sun H, Tan G, Uher C, Wolverton C, Dravid V.P, Kanatzidis M.G, Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals, *Nature* 2014, 508, 373–377. <https://doi.org/10.1038/nature13184>
- 25 Zhao L.D, Tan G, Hao S, He J, Pei Y, Chi H, Wang H, Gong S, Xu H, Dravid V.P, Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe, *Science* 2016, 351, 141–144 <https://doi.org/10.1126/science.aad3749>
- 26 Liu J, Wang P, Wang, M, Xu R, Zhang J, Liu J, Li D, Liang N, Du Y, Chen G, Achieving high thermoelectric performance with Pb and Zn codoped polycrystalline SnSe via phase separation and nanostructuring strategies, *Nano Energy* 2018, 53, 683–689. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.09.025>

- 27 Mao L, Yin Y, Zhang Q, Liu G, Wang H, Guo Z, Hu H, Xiao Y, Tan X, Jiang J, Fermi-surface dynamics and high thermoelectric performance along the out-of-plane direction in n-type SnSe crystals, *Energy Environ. Sci.* 2020, 13, 616–621. <https://doi.org/10.1039/C9EE03897C>
- 28 Zhao LD et al Ultrahigh power factor and thermoelectric performance in hole-doped single-crystal SnSe. *Science* 351(6269):141–144(2016). <https://doi.org/10.1126/science.aad3749>
- 29 Moshwan R, Yang L, Zou J, Chen ZG, Eco-Friendly SnTe Thermoelectric Materials: Progress and Future Challenges, *Adv Funct Mater* 27(43):30–44(2017). <https://doi.org/10.1002/adfm.201703278>
- 30 Zhao L.D, Wu H, Hao S, Wu C.I, Zhou X, Biswas K, He J, Hogan T.P, Uher C, Wolverton C, All-scale hierarchical thermoelectrics: MgTe in PbTe facilitates valence band convergence and suppresses bipolar thermal transport for high performance, *Energy Environ. Sci.* 2013, 6, 3346–3355. <https://doi.org/10.1039/C3EE42187B>
- 31 Wu D, Zhao L.D, Tong X, Li W, Wu L, Tan Q, Pei Y, Huang L, Li J.F, Zhu Y, Superior thermoelectric performance in PbTe–PbS pseudo-binary: extremely low thermal conductivity and modulated carrier concentration, *Energy Environ. Sci.* 2015, 8, 2056–2068 <https://doi.org/10.1039/C5EE01147G>
- 32 Chen Z, Jian Z, Li W, Chang Y, Ge B, Hanus R, Yang J, Chen Y, Huang M, Snyder G.J, Lattice Dislocations Enhancing Thermoelectric PbTe in Addition to Band Convergence, *Adv. Mater.* 2017, 29, 1606768. <https://doi.org/10.1002/adma.201606768>
- 33 Jood P, Ohta M, Yamamoto A, Kanatzidis M.G, Excessively Doped PbTe with Ge-Induced Nanostructures Enables High-Efficiency Thermoelectric Modules, *Joule* 2018, 2, 1339–1355. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.025>
- 34 Lee M.H, Yun J.H, Kim G, Lee J.E, Park S.D, Reith H, Schierning G, Nielsch K, Ko W, Li A.P, Synergetic Enhancement of Thermoelectric Performance by Selective Charge Anderson Localization–Delocalization Transition in n-Type Bi-Doped PbTe/Ag₂Te Nanocomposite, *ACS Nano* 2019, 13, 3806–3815. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b08579>
- 35 Li J, Zhang X, Chen Z, S Li W, Shen J, Witting I.T, Faghaninia A, Chen Y, Jain A, Low-Symmetry Rhombohedral GeTe Thermoelectrics, *Joule* 2018, 2, 976–987. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.02.016>
- 36 B. Dzundza, L. Nykyrui, T. Parashchuk, E. Ivakin, Y. Yavorsky, L. Chernyak, Z. Dashevsky, Transport and thermoelectric performance of n-type PbTe films, *J. Physica B* 588, 412178 (2020)
- 37 K. Wojciechowski, T. Parashchuk, B. Wiendlocha, O. Cherniushok, Z. Dashevsky. Advanced electronic structure engineering achieved by In and I doping in PbTe for the manufacture of a high-performance n-type thermoelectric leg, *J. Materials Chemistry C.* 8, 13270 (2020).
- 38 I.V. Chepkasov, A.G. Kvashnin, A.D. Radina, N.A. Matsokin, F.N. Jalolov, D.G. Kvashnin, A.R. Oganov, Z. Dashevsky, Origin of brittle behavior of doped PbTe-based thermoelectric materials, *Appl. Phys. Lett.* 124, 022104 (2024).
- 39 I. Chepkasov, A. Radina, V. Baidysheva, Z. Dashevsky, D. Kvashnin, A. Kvashnina, Tuning of Mechanical Properties of doped PbTe-based Thermoelectric Material Driven by Intrinsic Defects, *J. Material Chemistry A.* 13, (2025).

- 40 "I.A. Kumar, P. Bhumla, T. Parashchuk, S. Baran, S. Bhattacharya, and K.T. Wojciechowski, Engineering Electronic Structure and Lattice Dynamics to Achieve Enhanced Thermoelectric Performance of Mn–Sb Co-Doped GeTe, *Chem. Mater.*, 33 (2021) 3611 (2021)."
- 41 Jood, P.; Male, J. P.; Anand, S.; Matsushita, Y.; Takagiwa, Y.; Kanatzidis, M. G.; Snyder, G. J.; Ohta, M. Na Doping in PbTe: Solubility, Band Convergence, Phase Boundary Mapping, and Thermoelectric Properties. *J. Am. Chem. Soc.* 142,15464–15475(2020).
- 42 Cheikh D et al, Praseodymium Telluride: A High-Temperature, High-ZT Thermoelectric Material,*Joule* 2(4):698–709(2018). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.01.013>
- 43 Xing Y, Liu R, Liao J, Zhang Q,Xia X, Wang C,Huang H, Chu J,Gu M, Zhu T, High-efficiency half-Heusler thermoelectric modules enabled by self-propagating synthesis and topologic structure optimization,*Energy Environ. Sci.* 2019, 12, 3390–3399. <https://doi.org/10.1039/C9EE02228G>
- 44 Forman C, Muritala I.K, Pardemann R,Meyer B, Estimating the global waste heat potential,*Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- 45 Zebarjadi, M. et al, Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications,*Energy Environ. Sci.* 5, 5147–5162 (2012). <https://doi.org/10.1039/C1EE02497C>
- 46 Chierning, S,Bring on the heat. *Nat. Energy* 3, 92–93 (2018). DOI: 10.1038/s41560-018-0093-4
- 47 Hao, F. et al, Energ. High efficiency Bi₂Te₃-based materials and devices for thermoelectric power generation between 100 and 300°C, *Environ. Sci.* 9, 3120–3127 (2016). <https://doi.org/10.1039/C6EE02017H>
- 48 Kim C.S, Yang H.M, Lee J, Lee G.S, Choi H, Kim Y.J, Lim S.H, Cho S.H, Cho B.J, Self-Powered Wearable Electrocardiography Using a Wearable Thermoelectric Power Generator,*ACS Energy Lett.* 2018, 3, 501–507. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b01237>
- 49 Tang X,Xie W,Li h,Zhao W,Zhang q,Masayuki N,*Appl Phy Lett* 2007;90.012102(1-3).
- 50 Poudal B.Hao Q.Ma , High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys,*Science* 2008;320:634-8. <https://doi.org/10.1126/science.1156446>
- 51 Xie W, HE J,Kang JH, Identifying the Specific Nanostructures Responsible for the High Thermoelectric Performance of (Bi,Sb)₂Te₃ Nanocomposites,*Nano Lett* 2010;10:3283-9. <https://doi.org/10.1021/nl100804a>
- 52 Li J, Tan Q, Li JF, Liu DW, Li F, Li ZY, BiSbTe-Based Nanocomposites with High ZT: The Effect of SiC Nanodispersion on Thermoelectric Properties,*Adv Funct Mater* 2013;23:4317–23 <https://doi.org/10.1002/adfm.201300146>
- 53 Pan Y, Aydemir U, Grovogui J A, Witting I T, Hanus R, Xu Y, Wu J, Wu C-F, Sun F-H, Zhuang H-L, Dong J-F, Li J-F, Dravid V P and Snyder G J*Adv. Mater.* 30 1802016 (2018)
- 54 Kim S I, Lee K H, Mun H A, Kim H S, Hwang S W, Roh J W, Yang D J, Shin W H, Li X S, Lee Y H, Snyder G J and Kim S Dense dislocation arrays embedded in grain boundaries for high-performance bulk thermoelectrics,*W,Science* 348 109 (2015). <https://doi.org/10.1126/science.aaa4166>

- 55 Haixu Qin, Yang Zhang, Songting Cai, Yuxin Sun, Wei Wang, Liangjun Xie, Sibao Sun, Dandan Qin, Muchun Guo, Fengkai Guo, Haijun Wu, Qian Zhang, Wei Cai, Jiehe Sui, Critical role of tellurium self-compensation in enhancing the thermoelectric performance of p-Type $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ alloy, *Chemical Engineering Journal* 425 (2021) 130670 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130670>
- 56 Jun Asai, Mongkol Bumrungron, Toshiya Tsubochi, Takayuki Kanaya, Masaya Tachii, Toshiki Maeda, Kazuhiro Hasezaki, Shift of tellurium solid-solubility limit and enhanced thermoelectric performance of bismuth antimony telluride milled with yttria-stabilized zirconia balls and vessels, *Journal of the European Ceramic Society* 41 (2021) 188–194 <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.09.019>
- 57 Shuo Chen, Tingting Luo, Zhen Yang, Shenlong Zhong, Xianli Su, Yonggao Yan, Jinsong Wu, Pierre Ferdinand Poudeu Poudeu, Qingjie Zhang, Xinfeng Tang, Regulation of dynamic recrystallization in p-type Bi_2Te_3 based compounds leads to high thermoelectric performance and robust mechanical properties, *Materials Today Physics* 46 (2024) 101524 <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2024.101524>
- 58 Xicheng Guan, Zhiyuan Liu, Ni Ma, Zhou Li, Juan Liu, Huiyan Zhang, Hailing Li, Qian Ba, Junjie Ma, Chuangui Jin, Ailin Xia *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* <https://doi.org/10.1007/s40195-024-01794-x>
- 59 Ivanovaa L.D, Granatkinaa Yu.V, Nikhezinaa Yu.I, Malcheva A.G, Nikulina D.S, Shternb M.Y., and Erofeevab A.R, ISSN 2075-1133, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2024, Vol. 15, No. 5, pp. 1240–1248 <http://springer.com/journal/13188>
- 60 Okmin Park, Sang Jeong Park, Hyun-Sik Kim, Se Woong Lee, Minsu Heo, Sang-il Kim Enhanced thermoelectric transport properties of Bi_2Te_3 polycrystalline alloys via carrier type change arising from slight Pb doping, *Materials Science in Semiconductor Processing* 166 (2023) 107723 <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107723>
- 61 Ganesh Shridhar Hegdea, A.N. Prabhua, Y.H. Gaob, Y.K. Kuob, V. Raghavendra Reddyc G.S. Hegde, A.N. Prabhu, Y.H. Gao, Potential thermoelectric materials of indium and tellurium co-doped bismuth selenide single crystals grown by melt growth technique, *Journal of Alloys and Compounds* 866 (2021) 158814 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.158814>
- 62 Gelbstein Y and Davidow J, Highly efficient functional $\text{GexPb}_{1-x}\text{Te}$ based thermoelectric alloys, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16 20120(2014) <https://doi.org/10.1039/C4CP02399D>
- 63 Xu Z, Wu H, Zhu T, Fu C, Liu X, Hu L, He J, He J and Zhao X, Attaining high mid-temperature performance in $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ thermoelectric materials via synergistic optimization, *NPG Asia Mater.* 8 e302(2016). <https://doi.org/10.1038/am.2016.134>
- 64 Hao F, Qiu P, Tang Y, Bai S, Xing T, Chu H-S, Zhang Q, Lu P, Zhang T, Ren D, Chen J, Shi X and Chen L, High efficiency Bi_2Te_3 -based materials and devices for thermoelectric power generation between 100 and 300 °C, *Energy Environ. Sci.* 9 3120 (2016). <https://doi.org/10.1039/C6EE02017H>
- 65 Zhao XB, Ji XH, Zhang YH, et al. Bismuth telluride nanotube. Bismuth telluride nanotubes and the effect on the thermoelectric properties of nanotube-containing nanocomposites, *Appl Phys Lett* 2005;86.06211(1-3). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1863440>
- 66 Zhang X, Wang D, Wu H, Yin M, Pei Y, Gong S, Huang L, Pennycook S J, He J and Zhao LD, Simultaneously enhancing the power factor and reducing the thermal conductivity of

- SnTe via introducing its analogues, *Energy Environ. Sci.* 10 2420(2017) <https://doi.org/10.1039/C7EE02530K>
- 67 Deng R, Su X, Zheng Z, Liu W, Yan Y, Zhang Q, Dravid V P, Uher C, Kanatzidis M G and Tang X, Thermal conductivity in $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_{3+x}$ and the role of dense dislocation arrays at grain boundaries, *Sci. Adv.* 4 eaar5606 (2018). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar5606>
- 68 Deng R, Su X, Hao S, Zheng Z, Zhang M, Xie H, Liu W, Yan Y, Wolverton C, Uher C, Kanatzidis M G and Tang X, High thermoelectric performance in $\text{Bi}_{0.46}\text{Sb}_{1.54}\text{Te}_3$ nanostructured with ZnTe, *Energy Environ. Sci.* 11 1520(2018) <https://doi.org/10.1039/C8EE00290H>
- 69 Pan Y, Qiu Y, Witting I, Zhang L, Fu C, Li J-W, Huang Y, Sun F-H, He J, Snyder G J, Felser C and Li J-F, Synergistic modulation of mobility and thermal conductivity in $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ towards high thermoelectric performance, *Energy Environ. Sci.* 12 624(2019). <https://doi.org/10.1039/C8EE03225D>
- 70a Samanta M, Ghosh T, Arora R, Waghmare U V and Biswas K Realization of Both n- and p-Type GeTe Thermoelectrics: Electronic Structure Modulation by AgBiSe_2 Alloying, *J. Am. Chem. Soc.* 141 19505(2019). <https://doi.org/10.1021/jacs.9b11405>
- 70b Chang H-C, Chen T-H, Sankar R, Yang Y-J, Chen L-C and Chen K-H Highly improved thermoelectric performance of BiCuTeO achieved by decreasing the oxygen content, *Mater. Today Phys.* 15 100248(2020). <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100248>
- 71 Hareman JP, Jovovic V et al. Enhancement of thermoelectric efficiency, Enhancement of Thermoelectric Efficiency in PbTe by Distortion of the Electronic Density of States, *Science* 2008;321:554-7 <https://doi.org/10.1126/science.1159725>
- 72 Pei Y, Shi X, Lalonde A et al. Convergence of electronic band. *Nature* 2011, 473:66-9 <https://doi.org/10.1038/nature09996>
- 73 Pei Y, Lalonde A, et al. Stabilizing the optimal carrier. *Adv Mater* 2011, 23:5674-8 DOI: 10.1002/adma.201103153
- 74 Khadijeh Rajabi, Esmaeil Pakizeh, Hasan Tashakori, Fataneh Taghizadeh-Farahmand, First principle analysis of the structural, electrical and thermoelectric properties of YTe ($\text{Y} = \text{Si, Pb, Sn, Ge}$) and PbX ($\text{X} = \text{O, S, Se, Te}$) nano-layers, *Solid State Communications* 359 (2023) 115023 <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2022.115023>
- 75 Arun Raphael, Appu Kumar Singh, P. Vivekanandhan, S. Kumaran, Thermoelectric performance of nanostructured PbSnTeSe high entropy thermoelectric alloy synthesized via spark plasma sintering, *Physica B: Physics of Condensed Matter* 622 (2021) 413319 <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413319>
- 76 Sreeram P R, Neethu M, Nair, G Dayal, Senoy Thomas and M R Anantharaman, Ultra-high Seebeck coefficient of nanostructured Sb-substituted PbTe and fabrication of a thermoelectric generator module, *Bull Mater Sci* (2021) 44:9 <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02262-9>
- 77 Bagiyevaa G.Z, Abidinova G.J, Aliyevaa T.J, and Abidinova J.Sh ISSN 0020-1685, *Inorganic Materials*, 2023, Vol. 59, No. 12, pp. 1289–1294. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023. Russian Text © The Author(s), 2023, published in *Neorganicheskie Materialy*, 2023, Vol. 59, No. 12, pp. 1335–1340.
- 78 Tosawat Seetawan, Athron Vora-Ud, Fawad Ullah, Phan Bach Thang, Manish Kumar, Hong Joo Kim, Microstructural and thermoelectric properties of PbTe single crystals as

- grown by Czochralski method, *Materials Letters* 324 (2022) 132798
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132798>
- 79 Heremans J P, Jovovic V, Toberer E S, Saramat A, Kurosaki K, Charoenphakdee A, Yamanaka S and Snyder G Enhancement of Thermoelectric Efficiency in PbTe by Distortion of the Electronic Density of States, *J Science* 321 554(2008)
<https://doi.org/10.1126/science.1159725>
- 80 Tan G, Shi F, Hao S, Zhao L-D, Chi H, Zhang X, Uher C, Wolverton C, David V P and Kanatzidis M G, Non-equilibrium processing leads to record high thermoelectric figure of merit in PbTe–SrTe, *Nat. Commun.* 7 12167(2016) <https://doi.org/10.1038/ncomms12167>
- 81 Jood P, Ohta M, Yamamoto A and Kanatzidis M G *Joule* 2 1339(2018)
- 82 Khasim Saheb Bayikadi, Suman Abbas, Muhammad Yusuf Fakhri, Zeru Syum, Li-Chyong Chen, Kuei-Hsien Chen, Electronic and thermal transport engineering of a highly earth-abundant and low-cost Sn-based thermoelectric material, *Journal of Alloys and Compounds* 1008 (2024) 176803 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176803>
- 83 Roychowdhury S, Jana M K, Pan J, Guin S N, Sanyal D, Waghmare U V and Biswas K 2018 Soft Phonon Modes Leading to Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Performance in AgCuTe, *Angew. Chem. Int. Ed.* 57 4043
<https://doi.org/10.1002/ange.201801491>
- 84 Sarkar D, Ghosh T, Banik A, Roychowdhury S, Sanyal D and Biswas K 2020 Highly Converged Valence Bands and Ultralow Lattice Thermal Conductivity for High-Performance SnTe Thermoelectrics, *Angew. Chem. Int. Ed.* 59 11115
<https://doi.org/10.1002/anie.202003946>
- 85 Du B, Li h, Xu j, Tang x, Uher C, *Chem Mater* 2010;22:5521-7
- 86 Wang H, Li JF, Zou M, Sui t, Synthesis and transport property of as a promising thermoelectric compound, *Appl Phy Lett* 2008;93.202106(1-3).
<https://doi.org/10.1063/1.3029774>
- 87 Han MK, Androulakis J, Kim SJ, Kanatzidis MG., Lead-Free Thermoelectrics: High Figure of Merit in p-type AgSnmSbTem+2, *Adv Energy Mater* 2012;2:157–61
<https://doi.org/10.1002/aenm.201100613>
- 88 Yue Wua, Xiaofan Zhang, Boyi Wanga, Jingxuan Lianga, Zipei Zhanga, Jiawei Yang, Ximeng Donga, Shuqi Zhenga, Huai-zhou Zhao, Decoupling of thermoelectric transport performance of Ag doped and Se alloyed tellurium induced by carrier mobility compensation, *Journal of Materials Science & Technology* 101 (2022) 71–79
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.067>
- 89 Jingjie Du, Botao Zhang, Meng Jiang, Qihao Zhang, Keyi Zhang, Yan Liu, Lianjun Wang, and Wan Jiang, Inkjet Printing Flexible Thermoelectric Devices Using Metal Chalcogenide Nanowires, *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33, 2213564
<https://doi.org/10.1002/adfm.202213564>
- 90 Bin Xiao, He Yang, Jianbo Li, and Jun Wang, High-Density Arrangement of Nanoscale Regions with Tellurium Interstitial Atoms and Silver/Copper Vacancies in AgCuTe Thermoelectric Materials, *ACS Appl. Energy Mater.* 2024, 7, 8735–8743
<https://doi.org/10.1021/acsaem.4c01701>
- 91 Hong M, Chen Z-G, Yang L, Liao Z-M, Zou Y-C, Chen Y-H, Matsumura S and Zou J, Achieving $zT > 2$ in p-Type AgSbTe₂–xSex Alloys via Exploring the Extra Light

- Valence Band and Introducing Dense Stacking Faults, *J Adv. Energy Mater.* 8 1702333(2018) <https://doi.org/10.1002/aenm.201702333>
- 92 Roychowdhury S, Ghosh T, Arora R, Samanta M, Xie L, Singh N K, Soni A, He J, Waghmare U V and Biswas K Enhanced atomic ordering leads to high thermoelectric performance in AgSbTe₂, *Science* 371 722(2021) <https://doi.org/10.1126/science.abb3517>
- 93 Zhang Q, Liao B, Lan Y, Lukas K, Liu W, Esfarjani K, Opeil C, Broido D, Chen G and Ren Z High thermoelectric performance by resonant dopant indium in nanostructured SnTe, *Proc. Natl. Acad. Sci.* 110 13261(2013) <https://doi.org/10.1073/pnas.1305735110>
- 94 Sarkar D, Ghosh T, Banik A, Roychowdhury S, Sanyal D and Biswas K Highly Converged Valence Bands and Ultralow Lattice Thermal Conductivity for High-Performance SnTe Thermoelectrics, *Angew. Chem. Int. Ed.* 59 11115(2020) <https://doi.org/10.1002/anie.202003946>
- 95 Banik A, Ghosh T, Arora R, Dutta M, Pandey J, Acharya S, Soni A, Waghmare U V and Biswas K Engineering ferroelectric instability to achieve ultralow thermal conductivity and high thermoelectric performance in Sn_{1-x}GexTe, *Energy Environ. Sci.* 12 589(2019) <https://doi.org/10.1039/C8EE03162B>
- 96 Appu Kumar Singh, Rajeev Karthik, Punathil Raman Sreeram, Tarun Kumar Kundu, and Chandra Sekhar Tiwary, *Small* 2024, 20, 2403728 2403728 (1 of 11) © 2024 Wiley-VCH GmbH
- 97 Deqiang Yin, Chaochao Dun, Huisheng Zhang, Zheng Fu, Xiang Gao, Xianliang Wang, David J. Singh, David L. Carroll, Yang Liu, and Mark T. Swihart, Binary and Ternary Colloidal Cu-Sn-Te Nanocrystals for Thermoelectric Thin Films, *Small* 2021, 17, 2006729 <https://doi.org/10.1002/sml.202006729>
- 98 Khasim Saheb Bayikadi, Suman Abbas, Muhammad Yusuf Fakhri, Zeru Syum, Li-Chyong Chen, Kuei-Hsien Chen, Electronic and thermal transport engineering of a highly earth-abundant and low-cost Sn-based thermoelectric material, *Journal of Alloys and Compounds* 1008 (2024) 176803 <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176803>
- 99 Banik A and Biswas K, Lead-free thermoelectrics: promising thermoelectric performance in p-type SnTe_{1-x}Sex system, *J. Mater. Chem. A* 2 9620(2014) <https://doi.org/10.1039/C4TA01333F>
- 100 Banik A, Shenoy U S, Anand S, Waghmare U V and Biswas K Mg Alloying in SnTe Facilitates Valence Band Convergence and Optimizes Thermoelectric Properties, *Chem. Mater.* 27 581(2015) <https://doi.org/10.1021/cm504112m>
- 101 Al Rahal Al Orabi R, Mecholsky N A, Hwang J, Kim W, Rhyee J-S, Wee D and Fornari M Band Degeneracy, Low Thermal Conductivity, and High Thermoelectric Figure of Merit in SnTe–CaTe Alloys, *Chem. Mater.* 28 376(2016) <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5b04365>
- 102 Wang L, Tan X, Liu G, Xu J, Shao H, Yu B, Jiang H, Yue S and Jiang J Manipulating Band Convergence and Resonant State in Thermoelectric Material SnTe by Mn–In Codoping, *ACS Energy Lett.* 2 1203(2017) <https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.7b00285>
- 103 Mengrong Li, Pengzhan Ying, Zhengliang Du, Xianglian Liu, Xie Li, Teng Fang, and Jiaolin Cui, Improved Thermoelectric Performance of P-type SnTe through Synergistic Engineering of Electronic and Phonon Transports, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14, 8171–8178 <https://doi.org/10.1021/acsami.1c23530>

- 104 Daniela Delgado, Silvana Moris, Paulina Valencia-Gálvez, María Luisa López, Inmaculada Álvarez-Serrano, Graeme R. Blake and Antonio Galdámez, Structural Characterization and Thermoelectric Properties of Br-Doped $\text{AgSnm}[\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2}]\text{Te}_{2+m}$ Systems, *Materials* 2023, 16, 5213. <https://doi.org/10.3390/ma16155213>
- 105 Qiu Y, Liu Y, Ye J, Li J and Lian L Synergistic optimization of carrier transport and thermal conductivity in Sn-doped Cu_2Te , *J. Mater. Chem. A* 6 18928(2018) <https://doi.org/10.1039/C8TA04993A>
- 106 Luo Y, Jiang Q, Yang J, Li W, Zhang D, Zhou Z, Cheng Y, Ren Y, He X and Li X, Freestanding hollow double-shell $\text{Se}@\text{CN}_x$ nanobelts as large-capacity and high-rate cathodes for Li-Se batteries, *Nano Energy* 32 80–52. (2017) <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.12.010>
- 107 Luo Y, Yang J, Jiang Q, Li W, Zhang D, Zhou Z, Cheng Y, Ren Y and He X, Simultaneous regulation of electrical and thermal transport properties in CuInTe_2 by directly incorporating excess ZnX ($\text{X}=\text{S}, \text{Se}$) *Adv. Energy Mater.* 6 1600007–53. (2016) <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.12.023>
- 108 Xie H, Hao S, Cai S, Bailey T P, Uher C, Wolverton C, Dravid V P and Kanatzidis M G Ultralow thermal conductivity in diamondoid lattices: high thermoelectric performance in chalcopyrite $\text{Cu}_{0.8+y}\text{Ag}_{0.2}\text{In}_{1-y}\text{Te}_2$, *Energy Environ. Sci.* 13 3693–54. (2020) <https://doi.org/10.1039/D0EE02323J>
- 109 Hong Su, Ping Lu, Chenxi Zhu, Wujie Qiu, Xianxiu Qiu, Kunpeng Zhao, Xiaoyue Lu, Yuyu Wei, Xun Shi, Lidong Chen, Fangfang Xu, Compositionally tailored order-disorder of cation-anion sublattices in $\text{Cu}_2\text{Te}_{1-x}\text{S}_x$ solid solution thermoelectric materials, *Acta Materialia* 248 (2023) 118764 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118764>
- 110 Cheryl Sturm, Leilane R. Macario, Takao Mori and Holger Kleinke, Thermoelectric properties of zinc-doped $\text{Cu}_5\text{Sn}_2\text{Se}_7$ and $\text{Cu}_5\text{Sn}_2\text{Te}_7$, *This journal is © The Royal Society of Chemistry 2021 Dalton Trans.*, 2021, 50, 6561–6567 | 6561 <https://doi.org/10.1039/D1DT00615K>
- 111 Jungjoon Park, Jinmyeong Seo, Jae-Hong Lim and Bongyoung Yoo, Synthesis of Copper Telluride Thin Films by Electrodeposition and Their Electrical and Thermoelectric Properties, *Frontiers in Chemistry* | www.frontiersin.org 21 January 2022 | Volume 10 | Article 799305 original research published: 21 January 2022 doi: 10.3389/fchem.2022.799305 <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.799305>
- 112 Zhang J, Liu R, Cheng N, Zhang Y, Yang J, Uher C, Shi X, Chen L and Zhang W, *Adv. Mater.* 26 3848(2014)
- 113 Zhao K, Liu K, Yue Z, Wang Y, Song Q, Li J, Guan M, Xu Q, Qiu P, Zhu H, Chen L and Shi X Are Cu_2Te -Based Compounds Excellent Thermoelectric Materials? *Adv. Mater.* 31 1903480(2019) <https://doi.org/10.1002/adma.201903480>
- 114 Yu B, Liu W, Chen S, Wang H, Wang H, Chen G, Thermoelectric properties of copper selenide with ordered selenium layer and disordered copper layer, *Nano Energy* 2012;1(3):472–8 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.02.010>
- 115 Xu, Z., H. Wu, T. Zhu, C. Fu, X. Liu, L. Hu, *NPG Asia Materials*, Vol. 8, No. 9, 2016, pp. e302–e302
- 116 Wu H, Zhao LD, Zheng F, Wu D, Pei Y, Tong X, Broad temperature plateau for thermoelectric figure of merit $\text{ZT}>2$ in phase-separated $\text{PbTe}_{0.7}\text{S}_{0.3}$, *Nat Commun.* 2014;5(1):1–9 <https://doi.org/10.1038/ncomms5515>

- 117 Poudel B, Hao Q, Ma Y, Lan Y, Minnich A, Yu B, High-Thermoelectric Performance of Nanostructured Bismuth Antimony Telluride Bulk Alloys, *Science* 2008;320:634–8 <https://doi.org/10.1126/science.1156446>
- 118 Tan M, Deng Y, Wang Y, Ordered structure and high thermoelectric properties of Bi₂(Te,Se)₃ nanowire array, *Nano Energy*. 2014;3: 144–51 <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.07.009>
- 119 Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, O'quinn B, Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit, *Nature*. 2001;413(6856):597–602 <https://doi.org/10.1038/35098012>

Shailendra Kumar Gupta¹ (<https://orcid.org/0009-0005-5074-1581>),
Pragya Agarwal¹ (<https://orcid.org/0009-0007-6515-1909>),
Manoj Kumar² (<https://orcid.org/0000-0003-4048-3687>),
Sudhir Kumar Sharma² (<https://orcid.org/0009-0002-6206-8417>),
Suresh Kumar Sharma³ (<https://orcid.org/0000-0001-6271-1762>)

¹Department of Physics, D.B.S. College, Chhatrapati
Shahu Ji Maharaj University, Kanpur, India;

²Department of Physics, Harcourt Butler Technical
University, Kanpur, India;

³Department of Physics, School of Basic Sciences,
Chhatrapati Shahu Ji Maharaj University, Kanpur, India

Low Temperature Inorganic Thermoelectric Telluride P-type Materials: A Review

Renewable energy sources based on thermoelectric materials (TE) will be essential for solving the power crises and increasing global demand in the future. These materials have many advantages to use in power generation, cooling and heating and can generate usable electricity from different waste heat sources working at different temperature ranges. Our focus is on p-type low temperature inorganic Thermoelectric Telluride (TET) material, suitable near the room temperature. This review starts with a fundamental understanding of thermoelectric materials, their synthesis methodologies and advance strategies for enhancing the performance. Low temperature chalcogenide-based telluride TE materials play a very essential role and provide foundation along with promises for future applications. Finally, we summaries challenges and future prospective for inorganic TE materials.

Keywords: thermoelectric materials, telluride thermoelectric materials, low temperature thermoelectricity, renewable energy.