

УДК 621.315.592



Шучітангшу
Чаттерджі

Шучітангшу Чаттерджі

MECON Limited, Доранда, Ранчі,
Джаркханд, 834002, Індія

ТЕРМОЕЛЕКТРИКА ПО ІНДІЙСЬКОМУ СЦЕНАРІЮ

Однчасне керування електричними й тепловими властивостями матеріалів може привести до одержання дуже ефективних термоелектричних пристроїв. У термоелектричних матеріалах накладання градієнта температури створює напругу, і навпаки. Використовуючи цей зв'язок між тепловими й електричними властивостями, можна створювати пристрої, які переносять тепло від холодної до гарячої сторони або генерують електрику з теплових потоків. Забезпечення стійкого енергопостачання є однією з головних задач науки й техніки в XXI столітті. Існує гостра необхідність у поліпшених способах одержання енергії без великої залежності від викопного палива. Термоелектричні пристрої, що використовують ефект Зеебека для забезпечення прямого перетворення теплової енергії в електричну енергію, пропонують значні можливості для більш ефективного використання існуючих енергетичних ресурсів. Зокрема, термоелектричний спосіб генерування електроенергії дозволяє добути корисну електроенергію з відпрацьованого тепла. Однак продуктивність, вартість і доступність термоелектричних матеріалів створюють значні перешкоди для широкого впровадження термоелектричної технології. Комерційні термоелектричні пристрої як і раніше в значній мірі засновані на сплавах телуриду вісмуту, а їх термоелектрична добротність у комбінації з дефіцитом телуру обмежує використання цих пристроїв вузькоспеціалізованими використаннями. Із цих причин, дослідження в області термоелектричних матеріалів дуже активно ведуться в усьому світі, з переходом до зовсім нових класів матеріалів, що охоплюють не тільки широкий спектр неорганічних матеріалів, але також органічні молекули й полімери. У даному дослідженні відзначені успіхи, досягнуті в різних напрямках.

Ключові слова: Ефект Пельтьє, термоелектричний охолоджувальний шолом, динаміка обчислювальної рідини, теплопередача, теплова труба, швидкість об'ємного потоку, падіння тиску.

Controlling simultaneously the electric and thermal properties of materials can lead to very efficient thermoelectric devices. In thermoelectric materials, the application of a temperature gradient generates a voltage, and vice versa. By exploiting this coupling between thermal and electrical properties, devices can be made that carry heat from a cold side to a hot side or that generate electricity from heat flows. Ensuring a sustainable energy supply is one of the grand challenges for science and technology in the 21st century. There is an urgent need for improved ways of generating power, without heavy reliance on fossil fuels. Thermoelectric devices, which exploit the Seebeck effect to provide direct thermal into electrical energy conversion, offer considerable attractions for a more efficient use of existing energy resources. In particular,

thermoelectric power generation enables useful electrical power to be extracted from waste heat. However, the performance, cost and availability of thermoelectric materials are significant barriers to the broad implementation of thermoelectric technology. Commercial thermoelectric devices are still largely based on bismuth telluride alloys, and their thermoelectric figure of merit, combined with the scarcity of tellurium, limit these devices to niche applications. For these reasons, research in thermoelectric materials is very active worldwide, with the field rapidly advancing into entirely new classes of materials. This encompasses not only a wide range of inorganic materials, but also organic molecules and polymers. Advances following different routes were highlighted in this study.

Key words: Peltier Effect, Thermoelectric Cooling Helmet, Computational fluid dynamics, heat transfer, heat pipe, volume flow rate, Pressure drop.

Вступ

Прогрес у термоелектриці під егідою MECON: За останні 30 років Відділ по дослідженнях і розробкам MECON LTD, Ранчі, проробив велику роботу в області термоелектрики. Короткий огляд досягнень у цій області представлений у даній статті [1 – 10].

Твердотільний мікрокліматичний кондиціонер для оборонного персоналу

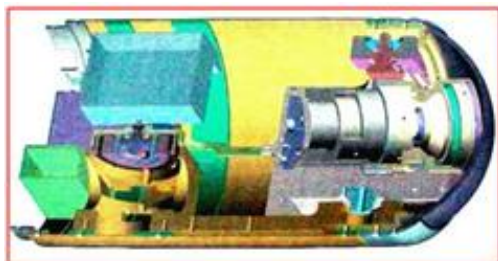
Твердотільний мікрокліматичний кондиціонер був успішно спроектований, розроблений і продемонстрований для оборонного персоналу, що працює в умовах високої температури навколишнього середовища або в пустелі. Охолоджуючий блок був інтегрований у головний бойовий танк Арджун і успішно продемонстрований у Головній дослідницькій лабораторії (CVRDE), Аваді. Остаточні демонстраційні випробування твердотільного охолоджуючого блоку були проведені на Махаджанському польовому стрільбищі в Раджастані (Індо-Пакистанська границя) у червні 2005 [11]. Проект був спонсорований DIPAS, (DRDO), Делі.



Протитанкова ракета

Розв'язування критичної проблеми протитанкової ракети був доручений MECON Лабораторією оборонних досліджень і розробок (DRDL), (Організація оборонних досліджень і

розробок) (DRDO), Хайдарабад. Проект був успішно виконаний і добре прийнятий DRDL. Проект фінансувався DRDL, DRDO, Хайдарабад і був завершений в 2004 році. Організацією-виконавцем була індійська армія [12 – 13].



Зігрівальні рукавички й шкарпетки для оборонного персоналу:

MECON успішно спроектував і розробив зігрівальні рукавички й шкарпетки з батарейним живленням для оборонного персоналу, що працює в умовах негативних температур. Проект фінансувався DIPAS (Індійською оборонною лабораторією), (DRDO), Делі. Проект був реалізований для захисту (Каргіл, Лех) і завершений в 2006 році.



Термоелектричні камери в холодильній мережі з живленням від автомобільної батареї 12 В постійного струму

Термоелектричні камери в холодильній мережі, розроблені MECON, підходять для застосування в програмах медицини й охорони здоров'я для зберігання й/або транспортування медикаментів, лікарських засобів, вакцин, сировотки, діагностичних матеріалів насінної рідини для міських і сільських районів. Проект фінансувався Міністерством науки й технологій, Делі. Організацією-Виконавцем був Всеіндійський інститут медичних наук. Проект був завершений в 2003 році [14 – 15].



Термоелектричний охолоджуючий / нагрівальний шолом

Розроблено три типи охолоджуючих / нагрівальних шоломів, які різняться технологією розробки, зручністю застосування й реалізацією у виробничих приміщеннях.

- А. Прямий охолоджуючий / нагрівальний шолом.
- Б. Шолом для охолодження/нагрівання у вигляді рюкзака.
- В. Шолом для охолодження / нагрівання на візку.

А. Прямий охолоджуючий / нагрівальний шолом.

Шолом оснащений ТЕ модулем і звичайним тепловідводом. Охолодження здійснюється за рахунок провідності, а тепловідвід – конвективний. Холодна сторона модуля перебуває в контакті з перфорованим алюмінієвим листом усередині шолома. Охолодження голови здійснюється за рахунок провідності над холодним алюмінієвим листом у напрямку до голови. Акумуляторна батарея, що перезаряджається, і електричний вимикач фіксуються поясом. В основі конструкції шолома – склопластикова оболонка з внутрішньою теплорозподільчою поверхнею, яка відділена від поверхні склопластика шаром ізоляції. Зовнішня й внутрішня поверхні склопластикової оболонки ізолювані, з отворами для відведення тепла від внутрішньої поверхні через термоелектричні модулі, термічно пов'язані із внутрішнім провідним шаром. Термоелектричні модулі термічно пов'язані із внутрішньою теплорозподільчою поверхнею. Кожний термоелектричний модуль термічно з'єднаний із зовнішнім тепловідводом, і такий тепловідвід має вбудований вентилятор, що дозволяє термоелектричному пристрою відводити тепло від внутрішньої теплорозподільчої поверхні при включеному електричному живленні. Теплорозподільча поверхня охолоджується в декількох точках, по можливості рівновіддалених, оптимізуючи, таким чином, зміни температури в лінійних напрямках убік від холодової точки. Теплорозподільча поверхня охоплює більшу частину поверхні голови й ефективно створює загальний об'єм повітря, завдяки чому поверхня голови перебуває в тих же умовах, які створюються при роботі термоелектричних модулів для всієї поверхні рівномірно. Таким чином, зовнішні тепловідводи орієнтовані щодо поверхні шолома так, що повітряні потоки незалежні й не створюють перешкод [16].



В. Охолоджуючий/нагрівальний шолом у вигляді рюкзака.

Такий шолом циркулює сухе й холодне повітря над головою, щоб тримати людину сухою, що деякою мірою буде створювати для неї прохолоду навіть у жарких кліматичних умовах. Система відводить близько 80 Вт метаболічного тепла від голови людини при температурі навколишнього середовища 55 °С. Наша система охолодження виготовлена з гібридного тепловідводу (конвективна й теплова труба) з термоелектричними модулями, малогабаритними вентиляторами, повітродувкою, акумуляторною батареєю для перенесення у вигляді рюкзака. Вузол тепловідводу містить такі компоненти як впускний канал (розбіжний), холодну пластину, впускний канал (збіжний), термоелектричні модулі, алюмінієвий блок, теплову трубу, ребра й вентилятор, як показано на рисунку нижче. Гаряче навколишнє повітря примусово продувається через холодну пластину



повітродувкою.

Повітродувки постійного струму спроектовані по радіальному типу й призначені для створення достатніх перепадів тиску для проходження потоку через холодну пластину. Розбіжні й збіжні канали направляють потік через холодну пластину. Холодна пластина має кілька перегородок, які сповільнюють плин і сприяють теплопередачі. Вентилятор з гарячої сторони використовується для полегшення примусової конвекційної теплопередачі від бічних ребер гарячої сторони. Об'ємна витрата для вентилятора була досліджена для досягнення бажаних характеристик конструкції. Тепло, що розсіюється з гарячої сторони ТЕ модулів, передається в теплову трубу через алюмінієвий блок. Передбачається, що втрати тепла (за рахунок конвекції й провідності) з боку алюмінієвого блоку відсутні, а температура модуля гарячої сторони приймається за температуру на вході в теплову трубу. Збільшення довжини теплової труби й збереження однакової кількості ребер не вплинуло б на якість розсіювання тепла гарячою стороною вузла. Однак при збільшенні кількості ребер на тепловій трубі розсіювання тепла може бути поліпшене [17].

С. Охолоджуючий/ нагрівальний шолом на візку:

Цей блок являє собою термомеханічне складання теплового насоса (термоелектричні модулі), тепловідводів, прокладки й холодних пластин, які працюють на термоелектричному принципі Пельтьє, вода використовується для накопичення й передачі тепла в системі охолодження. Холодна вода через вузьку трубку поглинає метаболічне тепло голови й передає його в холодну камеру, яка знову проохолоджується ТЕ модулем. Холодна поверхня модуля перебуває в контакті з холодною камерою, заповненою водою. Гаряча сторона модуля перебуває в контакті з тепловідводом, через який розсіюється тепло, що виділяється на гарячій поверхні модуля. Вентилятори використовуються для примусового розсіювання тепла. Чим швидше буде відведено тепло від гарячої поверхні, тим швидше знизиться температура холодної сторони.



Термоелектричний фільтр

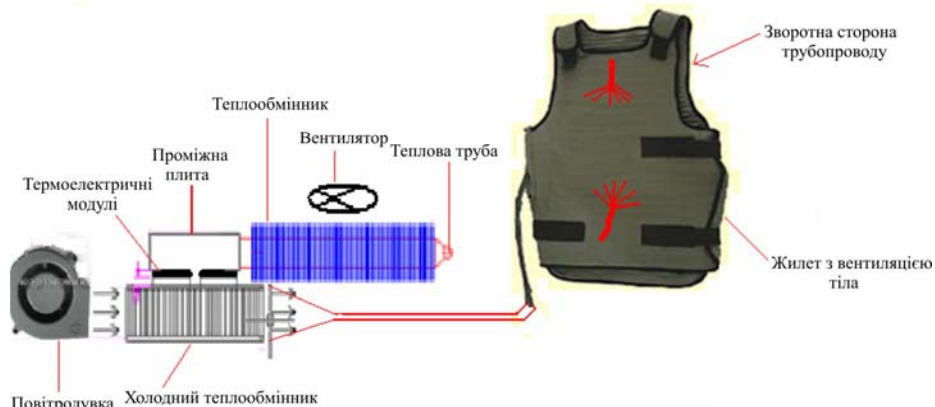
Відділ досліджень і розробок MECON успішно розробив систему й застосував її для свого індійського патенту для подолання проблеми холодного запуску в автомобілях, викликаній надзвичайно низькою температурою, з використанням термоелектричного пристрою разом з пристроєм акумулювання тепла. Тепловий акумулятор виконує функцію теплового резервуара, а термоелектричні модулі, що діють як теплові насоси, відводять тепло з теплового акумулятора й перекачують його у фільтр, що дозволяє швидко запускати автомобілі в холодних умовах. Експериментально доведено, що з використанням пропонованого обладнання автомобіль може бути запущений протягом 100 секунд [18].



Жилет для вентиляції повітря для оборонного персоналу

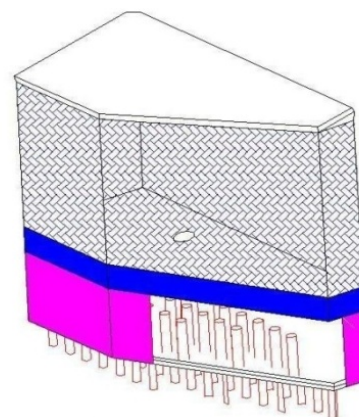
Військовий жилет для вентиляції повітря - це легка, зручна система, що дихає, типу трубки, яка одягається під одяг на шкіру. Він забезпечує охолодження для циркуляції сухого

повітря холодоагента до тулуба, щоб вилучити метаболічне тепло від персоналу, що працює в умовах перегріву. Система вимагає відводу від 80 до 90 Вт метаболічного тепла від людського тіла при температурі навколишнього середовища 55 °С, що забезпечується переносним вентилятором, акумуляторною батареєю, котра перезаряджається, [19].



Твердотільний резервуар для охолодження питної води для броньованих автомобілів:

Під час військових походів гострою проблемою для солдата є зручне одержання холодної питної води, особливо влітку. Як правило, через три години солдати використовували теплу воду для питних цілей, а через це фізіологічні параметри людського тіла погіршуються. Точно так само на військовому полі вони не могли одержати теплу або гарячу воду для приготування їжі. Таку теплу або гарячу воду вони могли б використовувати для розігріву індивідуального раціону харчування. Звідси й виник дизайн твердотільного охолоджувача / нагрівача води для персоналу армії, враховуючи всі граничні умови, дані для відповідних броньованих транспортних засобів. Концепція твердотільного охолодження/нагрівання використовується для охолодження або нагрівання води для броньованих транспортних засобів, які можуть працювати від джерела живлення постійного струму (в основному за допомогою резервної акумуляторної системи), напруга від 20 В до 28 В постійного струму, під час воєнних дій. Споживана потужність від джерела постійного струму залежить від таких параметрів як температура навколишнього середовища, напруга живлення й кількість тепла, яку необхідно відвести або використати [20].



Термоелектричні носилки:

Термоелектричні носилки на колесах з функцією нагрівання/ охолодження складаються в основному із двох частин:

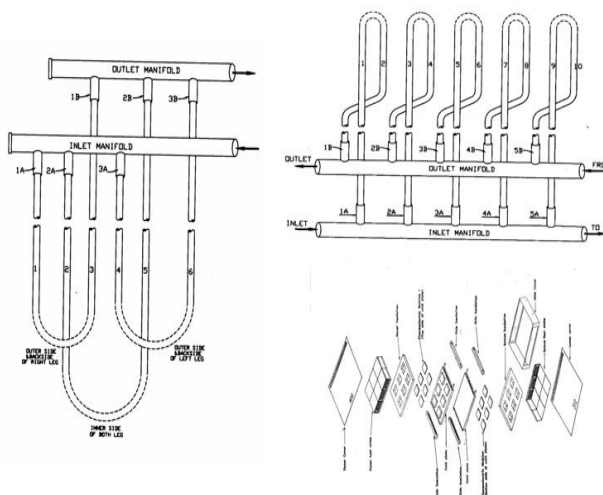
Частина – 1 Носилки, виготовлені з послідовно й паралельно з'єднаних провідних трубок для циркуляції гарячої або холодної рідини по всіх носилках для запобігання втрат солдатів.

Частина – 2 Термоелектричний блок охолодження/ нагрівання, який являє собою термомеханічний пристрій теплового насоса, а саме, термоелектричні модулі, тепловідводи й холодні приймачі, один об'ємний насос і один осьовий вентилятор для розсіювання тепла із

системи. Такі термоелектричні носилки забезпечать адекватне нагрівання або охолодження солдата залежно від його потреб шляхом зміни полярності термоелектричної матриці.



Система охолодження й обігріву, що використовує цю технологію, відновиться до твердотільного обладнання, що не містить хлорфторвуглеці. Це дуже надійні пристрої, які легко піддаються ремонту. Продуктивність системи забезпечується інноваційною конструкцією, складанням, яке стало здійсненим завдяки програмному забезпеченню, розробленому на основі нашого математичного моделювання. Було передбачено узгодження теплового опору всіх компонентів обладнання, розглянутих як дискретні теплові моделі з дискретними характеристиками.

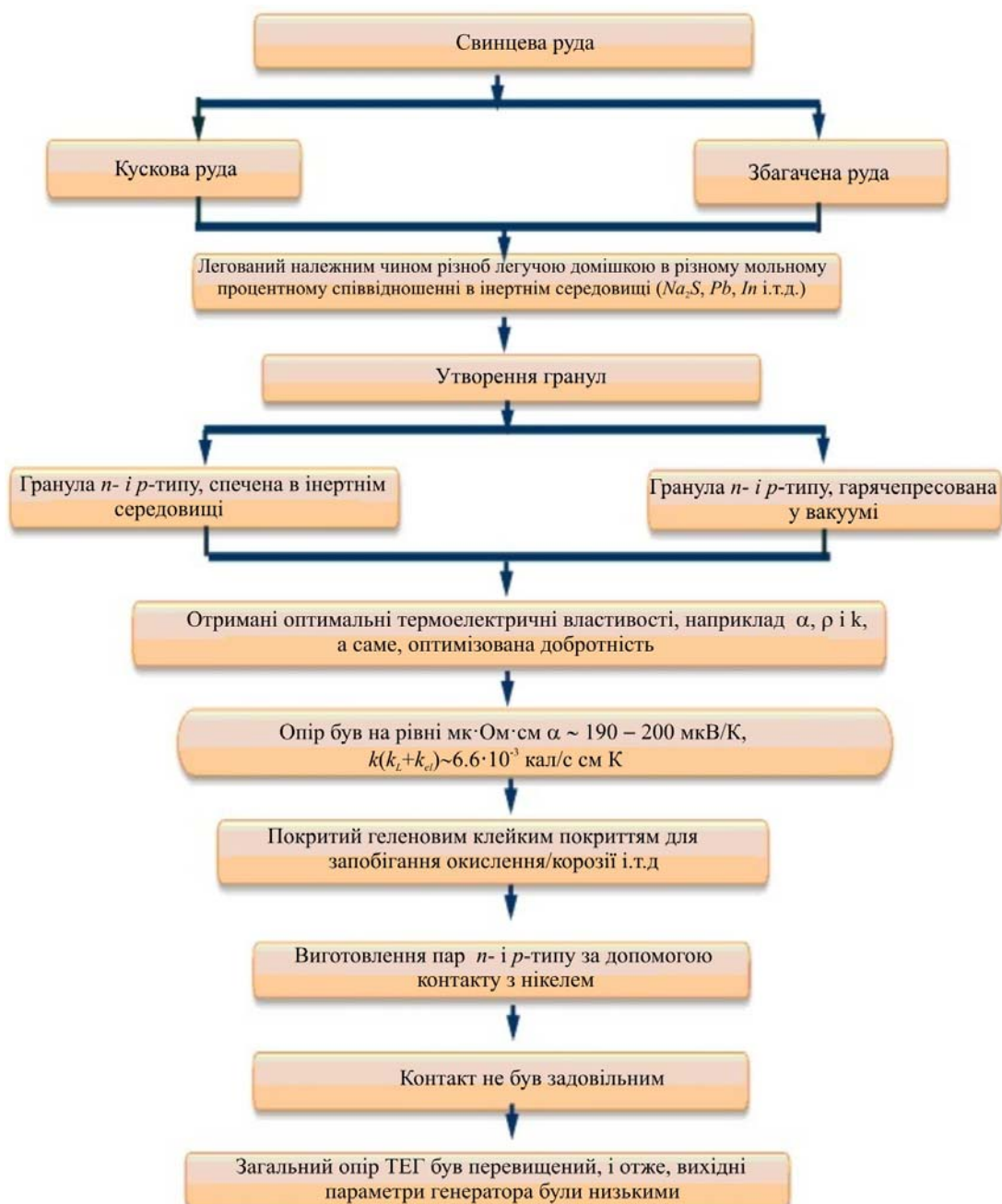


Носилки з охолоджуючою рідиною використовуються для поглинання надлишкового метаболічного тепла з організму із застосуванням рідини, наприклад, води, охолоджуваної термоелектричним способом. У даному пристрої охолодження досягається за рахунок проходження через трубки із ПВХ холодоагента. Холодоагент поглинає метаболічну теплову енергію й надходить у термоелектричний охолоджуючий блок, який відбирає від нього теплову енергію. Таким чином, система працює в замкненому контурі.

Блок являє собою термомеханічне складання теплового насоса (термоелектричні модулі), тепловідводи, прокладки й холодні пластини. Термоелектричні модулі розташовані між тепловідводами з однієї сторони й прокладками й холодною пластиною з іншої сторони. Кожна

холодна пластина, у свою чергу, вставлена між двома складальними вузлами. Кожний із цих складальних вузлів складається з комплексу термоелектричних модулів, тепловідводів і прокладок. Декілька сендвіч-пристроїв можуть бути зібрані разом для видалення необхідної кількості тепла з води, що протікає через холодну пластину. Якщо потрібно, для пропускання води через холодну пластину використовується необхідний насос, розташований послідовно або паралельно. Холодна пластина має спіральний отвір із перепонами на шляху потоку, щоб забезпечити максимальну площу теплопередачі, а також турбулентність потоку. Вентилятори монтуються (при необхідності) у певних місцях для ефективного відводу тепла від тепловідводів. Тепловідводи мають оптимальну конструкцію ребер для забезпечення максимальної площі теплопередачі.

Галеновий термоелектричний генератор: [21-26]





Збагачена руда



Гранули



Кускова руда



Термоелектричний генератор

Термоелектрика по індійському сценарію - крім MECON

Успішні дослідження в області термоелектрики провели:

Доктор Чандра Мохан Бхандарі з Аллахабадського університету.

Теплопровідність сплавів *Ge-Si* при високій температурі; роль поздовжніх і поперечних фононів у гратковій теплопровідності *GaAs* і *InSb*; температурна залежність ефективної маси густини станів і електронних і фононних внесків у тепловий опір легованих сплавів *Si-Ge* при високих температурах; вплив точкових дефектів на термоЕРС фононного захоплення; термоЕРС захоплення носіїв магнонами; теплопровідність сильно розупорядкованих напівпровідникових сплавів; вплив розміру зерна на ефективність термоелектричного перетворення напівпровідникових сплавів при високій температурі; узагальнення рівняння теплопровідності Каллауея; теоретичний аналіз термоелектричної добротності; температурна залежність добротності поліпшених термоелектричних матеріалів на основі телуриду свинцю; граткова теплопровідність дрібнозернистого термоелектричного матеріалу *Pb-SnTe* і *Pb-GeTe*; електронний внесок у теплопровідність напівпровідників з вузькою забороненою зоною: ефект непараболічності зон; на шляху до мінімуму теплопровідності: термоелектричні міркування; розчинність у термоелектричних напівпровідниках у твердій фазі; коефіцієнт Зеєбека й електропровідність сплавів *Si-Ge*; термоЕРС фононного захоплення в мідних сплавах; дрібнозернисті сплави *Si-Ge* як чудові термоелектричні матеріали; роль електронного теплопереносу для ефекту непараболічності зони термоелектричного матеріалу; термоелектрична поведінка багатодолинних напівпровідників; вплив неосновних носіїв на термоелектричну добротність; одержання й термоелектричні властивості поліпшених сплавів *PbSnTe* [27 – 30].

Д-р Рамеш Чандра Маллік з Індійського наукового інституту, м. Бангалор.

Синтез об'ємного четвертинного $Cu_2ZnSnSe_4$ з використанням кульового млина й термоелектричні дослідження; термоелектричні властивості *PbTe*, легованого *In* і *I*, *BiCuSeO*, легованого *Sn*, тетраедрита, легованого *Bi*, тетраедрита, легованого *Cd*, $Cu_2CdSnSe_4$, легованого *In*, *PbTe* із вторинною фазою індію й вісмуту, *Co*-заміщеного синтетичного тетраедрита; синергетична комбінація структурної інженерії на атомному рівні й наноскопічний підхід у напівгеіслерових напівпровідникових термоелектричних матеріалах *p*-типу на основі *ZrCoSb* для високих *ZT*; термоелектричні матеріали для застосування в датчиках; мультизаповнені скуттерудити *n*-типу, леговані *In*; термоелектричні властивості *Mn*-заміщеного синтетичного тетраедрита; поліпшення електропровідності в сплавах $Pb_{1-y}Sn_yTe$, легованих марганцем для високотемпературних термоелектричних застосувань; наноструктурування скуттерудитів *p*- і *n*-типу, що досягають добротності порядку 1.3 і 1.6 відповідно; термоелектричні властивості сплавів $PbTe_{1-y}Se_y$, легованих індієм; Cu_2GeSe_3 , Cu_2SnSe_3 , легований *Zn*; двофазний *PbTe* з включеннями індію; скуттерудити $Fe_{0.2}Co_{3.8}Sb_{12-x}Te_x$, халькогенід на основі $Cu_{2.1}Zn_{0.9}Sn_{1-x}In_xSe_4$

($0 < x < 0.1$), термоелектричні властивості $PbTe$ із включеною вторинною фазою вісмуту; скуттерудити $Co_{44}Sb_{12}$ з додаванням Bi ; халькогенід на основі $Cu_{2+x}ZnSn_{1-x}Se_4$; скуттерудити $Co_{44}Sb_{12}$, заповнені індієм і леговані германієм, і дослідження термоелектричних властивостей інших матеріалів [31-35].

Доктор Раві Кумарн із Індійського технологічного інституту, м. Мадрас.

Термодинамічне моделювання системи $Ti-Zr-N$; теплопровідність пінокерамічних матеріалів $Si-B-C-N$, отриманих з вихідної речовини з використанням сагової пальми як витратного шаблону.

Професор Тапас Де з Індійського технологічного інституту, м. Харагпур.

Теплопровідність і в'язкість нанорідини Al_2O_3 на основі холодоагента моторного двигуна; дослідження теплопровідності, в'язкості й електропровідності нанорідин на основі графена; теплофізичні характеристики й характеристики кипіння у великому об'ємі нанорідин ZnO -етиленгліколя; дослідження теплообміну в умовах кипіння у великому об'ємі й критичного теплового потоку нанорідин ZnO -етиленгліколя; теплові властивості композитів з поліетилену високої густини, наповнених кремнієвим порошком; значення міжфазного шару й кластеризації для ефективної теплопровідності CuO -нанорідин трансмісійного масла; надлишкова електропровідність і термоЕРС гранул ($YBa_2Cu_{305}O_x$) Ag_n ; температурна залежність термоЕРС сполук $La_{1-x}K_xMnO_3$ у світлі двохфазної моделі; термоЕРС нелегованого й легованого надпровідника $Y-Ba-Cu-O$ у діапазоні 77 – 300 К; температурна залежність електропровідності й термоЕРС $Bi-Sb$ – стрічок, отриманих рідинним загартуванням; термоЕРС дезоксигенованих спечених надпровідних гранул $Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$; термоЕРС надпровідних самарій-заміщених гранул $Y_{1-x}Sm_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$; теплопровідність міднокислих надпровідників $Bi-Pb$ (2223): вплив легування й часу термообробки [36 – 41].

Доктор У.В. Варадараджу з Індійського технологічного інституту, м. Мадрас.

Термоаналітичні дослідження золь-гель синтезу $YBa_2Cu_3OV_7$; термодинамічна стійкість потрійних оксидів у системі $Ba-Pb-O$ за допомогою ТДС-методу; дослідження високотемпературного опору й термоЕРС на заміщених системах $Bi-2212$ і $Bi-2201$; термоаналітичне дослідження сполуки $YBa_2Cu_3O_{6.5}$; дослідження опору, термоЕРС і тунелювання поодиноких часток на деяких легованих цинком надпровідниках іттрія барію окису міді; підвищення термоЕРС у високотемпературному надпровіднику іттрія барію окису міді ($YBa_2Cu_3O_7$) і споріднених сполук [42].

Професор Умарджі Арун М з Індійського наукового інституту, м. Бангалор.

Силіциди є потенціальними кандидатами для високотемпературних застосувань, таких як нагрівальні елементи, захисні покриття, керамічні двигуни і т.д. завдяки їхній нетоксичності, наявності сировини, хімічної й термічної стійкості. Незважаючи на свої переваги, термоелектрична ефективність (ZT) матеріалу низька. Тому додаються зусилля для підвищення термоелектричної ефективності матеріалу. Проектування зонної структури й фононна інженерія відносяться до методологій по поліпшенню властивостей матеріалу. Цього можна досягти шляхом хімічного легування й наноструктурування. У свою чергу, це можна здійснити шляхом легування матеріалу Mn , Co , B і т.д. Наноструктурування може підвищити величину ZT за рахунок зменшення теплопровідності. Вплив сполуки на термоелектричні властивості полікристалічного $CrSi_2$, дисиліциду хрому, Mn і Al на термоелектричні властивості дисиліциду хрому, контроль стехіометрії кисню й термоелектричні властивості в $(RE)BaCo_2O_{5+\delta}$, механічно легований силіцид хрому; наноструктурування через твердофазне перетворення [43 – 45].

Доктор Р. Гопалан із Центру автомобільних енергетичних матеріалів.

Провів успішні дослідження в області високотемпературних надпровідників, магнітних матеріалів, літій-іонної батареї, кореляції термоелектричних, структурних властивостей функціональних матеріалів, обробки нанопорошків сплаву *Fe-Co-Sb* високочастотним плазмовим методом [46 – 49].

Проф. Паллаб Банерджі з Індійського технологічного інституту, м. Харагпур.

Область його інтересів охоплює низькорозмірні напівпровідники: структури й пристрої, матеріали для енергетичних застосувань, такі як термоелектрика й фотоелектрика, фотоніка, III-V і інші напівпровідникові сполуки.

Дослідження *Zn*-резонансних рівнів і термоелектричних властивостей в *PbTe*, легованому йодом з наноструктурами *ZnTe*; явище переносу носіїв і термоелектричні властивості в легованому телуром сплаві *Bi_{0.88}Sb_{0.12}* *n*-типу, вирощеному з розплаву, термоелектричні властивості *PbSe_{0.5}Te_{0.5}*: *x* (*PbI₂*) з ендотаксіальними наноструктурами: перспективний термоелектричний матеріал *n*-типу; альтернативний підхід до оптимальної концентрації носіїв для досягнення ідеальної термоелектричної ефективності, підвищення термоелектричного фактора потужності за рахунок зміни електронної структури в *PbTe*: *Cr*; різке підвищення термоелектричного фактора потужності в *PbTe*: *Cr*, легованому йодом, впровадження збагачених *Ag* наноточок в *PbTe*: поліпшення термоелектричних властивостей за рахунок енергетичної фільтрації носіїв; термоелектричні властивості нанокompatитів *PbTe*, індуковані структурою посилення [50 – 53].

Проф. Аритра Банерджі з Університету Калькутти.

Синтез і визначення характеристик (перенос, магнітні й оптичні властивості); структурні й термоелектричні властивості, викликані дефектами; вплив загартування при різних температурах; кореляція між дефектом і магнетизмом *Zn_{0.95}Mn_{0.05}O*, імплантованого й неімплантованого низькопотенціальним *Ar⁺⁹*; магнітні властивості *ZnO*, легованого *Mn*: роль маршруту синтезу, спільне легування *Mg* і *Al* тонких плівок *ZnO*: вплив на ультрафіолетову фотопровідність, магнітні, резонансні, оптичні властивості [54].

Д-р Каурав Нетрам з Наукового коледжу Холкара, м. Індор.

Працює над тепловими властивостями (у тому числі, термоЕРС) матеріалів на основі заліза. Наше дослідження показує, що ці матеріали можуть використовуватися для низькотемпературного охолодження. Ведеться обговорення деяких недавніх результатів по сполуках *FeSe/FeTe/FeS*. Підвищення термоелектричної ефективності шляхом заміщення *Y* на *SrSi₂*. Таким чином, досягається значення *ZT* при кімнатній температурі на рівні 0.4 для *Sr_{0.92}Y_{0.08}Si₂*, приблизно на порядок перевищує цю величину для стехіометричного *SrSi₂*. Висока величина й складна температурна залежність термоЕРС (*S*) у сполуках *YMn_{1-x}Ru_xO₃*. У цей час ведуться роботи з визначення властивостей у матеріалах перовскітного типу, які залежать від ефективного й точного контролю хімічного тиску шляхом заміни іонних радіусів *A/B* атомів. Це зв'язане не тільки з тим, що особливі електронні, магнітні й теплові властивості пов'язані з певними валентними станами атомів *A/B* в цих оксидах, але також тому, що навіть невелика нестехіометрія може погіршити бажані властивості, такі як змішання валентностей. В інших випадках бажана наявність певних нестехіометричних дефектів, таких як іонні й/ або електронні провідники в батареях, паливних елементах і т. д. Насправді ця захоплююча й перспективна область досліджень як і раніше широко обговорюється, оскільки підвищення термоелектричної ефективності й основні фізичні механізми ще далекі від остаточного роз'яснення й/ або досягнення. Це завдання припускає ретельний розгляд змін для різних властивостей теплового переносу, зокрема, термоелектричної ефективності шляхом зміни

хімічного тиску в подвійних перовскітах типу $A_2B''B''O_6$. У цей час робота перебуває в стадії підготовки зразка.

Д-р Кумар Чаттопадхай Маулінду із Центру передових технологій імені Раджі Раманні.

Визначив температурну залежність термоЕРС і теплопровідності у феромагнітному сплаві з ефектом запам'ятовування форми *Ni 50 Mn 34 B 16* у магнітних полях; дослідження термоЕРС у системі $YBa_{2-x}Ca_xCu_3O_{7-\delta}$ [55].

Д-р Д. Шива Прахашам із Центру автомобільних енергетичних матеріалів ARCI.

Виконав синтез наноматеріалів, визначення характеристик, консолідацію, кореляцію структурних властивостей. Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія, іскрове плазмове спікання; виготовлення термоелектричних матеріалів і пристроїв, одержання нанокристалічного порошку термоелектричного сплаву *Fe-Co-Sb* радіочастотним плазмовим методом.

Д-р Радж Кішора Даш із Університету Хайдарабаду

Досліджував властивості наноматеріалів (металів, оксидів металів, вуглецевих нанотрубок і графена), морфологію наноструктурних термоелектричних матеріалів Bi_2Te_3 , раціональний синтез наноструктурних термоелектричних матеріалів Bi_2Te_3 з регульованою морфологією. Застосування наноматеріалів / нанотехнологій у датчиках, теплопередачі, аерокосмічній промисловості, НЕМС, автомобілебудуванні, сонячних елементах, нанорідинах. MEMS, НЕМС, датчики, біо-MEMS, мікрорідинні пристрої й нано / технологія / технології-мікротехнології. Термодинамічна поведінка зразкового ковалентного матеріалу, описуваного міжатомним потенціалом, що залежить від умов навколишнього середовища; вплив параметрів хімічного синтезу на структуру.

Д-р Вайтисваран з ACRHEM (Передового центру досліджень високоенергетичних матеріалів), Університет Хайдарабаду.

Провів дослідження в області напівпровідникової теорії, матеріалознавства, магнетизму, надпровідності, досліджень високого тиску, вивчення пружних і механічних властивостей з використанням розрахунків функціонала густини з перших принципів. Вивчення структурної механічної поведінки й поведінки при високому тиску високопотенціальних матеріалів. Подвійні перовскіти (спінтронні матеріали), мультиферроїки, рідкісноземельні сполуки, оксиди рідкісноземельних і перехідних металів, гейслерові сплави, вивчення матеріалів в екстремальних умовах.

Д-р Манджуша Баттабьял з ARCI.

Провів дослідження в області порошкової металургії, лиття під тиском, іскрового плазмового спікання й гарячого ізостатичного пресування. Виготовлення термоелектричних матеріалів і пристроїв. Високотемпературні матеріали. Трансмисійна електронна мікроскопія. Теплофізичні властивості. Механічні випробування.

Проф. Ранджан Кумар з Пенджабського університету.

Провів дослідження теоретичної фізики конденсованих середовищ: дослідження структури, фононів, електронних і механічних властивостей, термодинамічних властивостей чистого й легованого (B, N) графена, впливу тиску на електронні й термоелектричні властивості силіциду магнію. Дослідження електронних і термоелектричних властивостей Mg_2C з перших принципів. Вплив розупорядкування на електронні, магнітні й оптичні властивості гейслерових сплавів Co_2CrZ . [56 – 57].

Д-р Д.К. Мішра з Національної фізичної лабораторії Ради наукових і промислових досліджень (CSIR-NPL).

Провів дослідження з розробки матеріалів з перспективними низькотемпературними напів-

провідниковими термоелектричними властивостями; дослідницький синтез і визначення характеристик нових неорганічних сполук. Скуттерудити, сполука фази Цинтля на основі Mg_3Sb_2 , об'ємний наноккомпозит на основі напів-гейслерових сплавів для поліпшення термоелектричної ефективності, високотемпературні матеріали для термоелектричного перетворення (наприклад, скуттерудити, сполука фази Цинтля на основі Mg_3Sb_2 , напів-гейслерові й гейслерові наноккомпозити й інші новітні матеріали), моделювання кристалічних структур, аналіз електронної дифрактограми.

Д-р Дебананд Са з Бенареського індійського університету.

Провів дослідження корельованих електронних систем, низькотемпературної й високотемпературної надпровідності, Фермі-рідин і не-фермі-рідин у низькорозмірних системах, Кондо й квантової домішкової проблематики, вкладених систем і систем спін-пайерлса, ферроїчних і мультиферроїчних матеріалів, виникаючих теорій топологічних ізоляторів і надпровідників.

Рамановське розсіювання в орторомбічному мультиферроїчному $RMnO_3$. Надпровідність в $Na_xCoO_2 \cdot H_2O$, прихована квантова критична точка у ферромагнітному надпровіднику, надпровідність із не-фермі-рідини: підхід Гінзбурга-Ландау, узагальнений підхід Гінзбурга-Ландау до генерації другої гармоніки.

П. Моніка Мудгель із Національної фізичної лабораторії.

Досліджувала негативну термоЕРС надлишково легованого $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$ надпровідника, аномальну термоЕРС системи $Mg_{1-x}Al_xB_2$, де $x = 0.0 - 1.0$.

Література

1. Chatterjee S. & et. al, Effect of Sintering Temperature and Time on the Electrical Properties of Pellets Made from Beneficiated Galena Ore. *J. Mater. Sci* 22, 2793 (1987).
2. Chatterjee S. & et. al, Low Cost Solar Selective Absorbers from Indian Galena. *J. Optical Engineering* 32(11), 2923 (1993).
3. Chatterjee S. & et. al, Stress Developed on Typical Galena Thermocouples, *J. Thermoelectricity* 1(1997).
4. Chatterjee S. & et. al, An Improved Setup for the Simultaneous Measurement of Thermoelectric Coefficient and Electrical Conductivity in Vacuum/Inert Atmosphere at Different Ambient Temperatures. *J. Inst. Soc. India* 17, 87 (1987).
5. Chatterjee S. & et. al, Feasibility Study on Dross Galena for Thermoelectric Generator, *J. MECON, India* 14(2), 67 (1995).
6. Chatterjee S. & et. al, On the Electrical and Thermoelectric Properties of Sintered PbS Pellets, *Proc. 5th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion* (USA, Arlington, University of Texas, March, 1984), P. 145.
7. Chatterjee S. & et. al, On Low Cost Approach for Fabrication Lead Sulphide Based TEG for Terrestrial Applications, *Proc. 7th Miami International Conference on Alternative Energy Source* (USA, Florida, University of Miami, December, 1985), p. 425.
8. Chatterjee S. & et. al, On the Properties of Thermoelements Made by Hot Pressing Galena and Beneficiated Galena Ore, *Proc. 6th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion* (USA, Arlington, University of Texas, March, 1986), p. 59.
9. Chatterjee S. & et. al, Thermoelectric Generator Using Natural Galena Aggregate and Galena Concentrate, *Proc. 7th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion* (USA, Arlington,

- University of Texas, March, 1988), p. 14.
10. Chatterjee S.& et. al, Solid State Cooling / Heating Micro Climate Conditioning Device & a Garment Connected Therewith, *Patent Sealing No. 195457, d/t 20-02-2001*.
 11. Chatterjee S.& et. al, Athermalization of Infra-Red Camera of Projectile Weapons, *J. Applied Thermal Engineering* **29**(10), 2106 (2009).
 12. Chatterjee S.& et. al, A Novel Mechanism for Athermalization of Themographic Camera Using Thermoelectrics, *Proc. 19th National & 8th ISHMT– ASME Heat and Mass Transfer Conference* (India, JNTU Hyderabad, January, 2008).
 13. Chatterjee S.& et. al, Solid State Cooling / Heating Box, *Patent Sealing No. 198979, d/t 16-02-2000*.
 14. Chatterjee S. & et. al, Thermoelectric Cold Chain Chests for Storing/Transporting Vaccines at Remote regions, *J. Applied Energy* **76**(4), 415 (2003).
 15. Chatterjee S.& et. al, Thermoelectric – Direct Cooling/Heating Helmet, *Patent filing No. 1339/KOL/2015, d/t December 28, 2015*.
 16. Chatterjee S.& et. al, Hybrid Thermoelectrically Cooled/Heated Back Pack Air Circulating Helmet System, *Patent filing No. 1111/KOL/2013, d/t September 27, 2013*.
 17. Chatterjee S.& et. al, Solid State/Thermoelectrically Heated Oil/Diesel Filter for Automobiles in Cold Regions, *Patent filing No. 1429 / KOL / 2007, d/t October 18, 2007*.
 18. Chatterjee S.& et. al, Solid State Air Warrior Body Ventilation Vests for Defence Personnel, *J. Inst. Soc. India* **46**(1), 40 (2016).
 19. Chatterjee S.& et. al, Conceptual Design & Simulation on Peltier Cooling Drinking Water System for Armoured Vehicles, *J. Inst. Soc. India* **44** (4), 227 (2014).
 20. Chatterjee S.& et. al, Process for Preparing p-type Thermoelements for Thermoelectric Device from Galena Concentrate, *Patent Sealing No. 174526, d/t 09-08-1990*.
 21. Chatterjee S.& et. al, Process for Preparing n-type Thermoelements for Thermoelectric Devices from Galena Concentrate, *Patent Sealing No. 174527, d/t 09-08-1990*.
 22. Chatterjee S.& et. al, Process for Preparing p-type Thermoelements for Thermoelectric Devices from Galena Aggregate, *Patent Sealing No. 174528, d/t 09-08-1990*.
 23. Chatterjee S.& et. al, Process for Preparing n-type Thermoelements for Thermoelectric Devices from Galena Aggregate, *Patent Sealing No. 174529, d/t 09-08-1990*.
 24. Chatterjee S.& et. al, Process for Preparing High Temperature Sustaining Adhesive for Thermoelectric Modules, *Patent Sealing No. 182797, d/t 25-07-1995*.
 25. Chatterjee S.& et. al, A Divisional Patent on Process for Preparing Thermoelectric Modules Using High Temperature Sustaining Adhesive and Their Process for Preparing Thermoelectric Modules Using High Temperature Sustaining Adhesive, *Patent Sealing No. 185728, d/t 25-07-1995*.
 26. Singh M. P. and Bhandari C.M., Thermoelectric Properties of Bismuth Telluride Quantum Wires, *Solid State Communications* **127**, 649 (2003).
 27. Tripathi M. N. and Bhandari C. M., High-Temperature Thermoelectric Performance of Si–Ge Alloys. *J. Phys.: Condens. Matter.* **15**, 5359 (2003).
 28. Singh M. P. and Bhandari C. M., High-Temperature Thermoelectric Behavior of Lead Telluride, *Pramana-Journal of Physics* (Accepted).
 29. Bhandari C. M., Germanium-Silicon Alloys as High Temperature Thermoelectric Materials, *Contemporary Physics* **21**, 219 (1960).
 30. Chetty Prem Kumar D. S, R., Femi O.E., Chattopadhyay K., Malar P., and Mallik R. C.. Thermoelectric Properties of Bi Doped Tetrahedrite, *J. Electronic Materials* **1-7** (2016).

31. Bali A., Chetty R., and Mallik R. C.. Thermoelectric Properties of PbTe with Indium and Bismuth Secondary Phase, *Indian J. Physics* 90, 665 (2016).
32. Chetty Raju, Bali Ashoka, and Mallik Ramesh Chandra, Tetrahedrites as Thermoelectric Materials: An overview, *J. Materials Chemistry C* 3, 2364 (2015).
33. Bali Ashoka, Wang H., Snyder G. J., and Mallik Ramesh Chandra, Thermoelectric Properties of Indium Doped $PbTe_{1-y}Se_y$ Alloys, *J. Applied Physics* 116, 033707 (2014).
34. Bali Ashoka, Kim Il-Ho, Rogl Peter, and Mallik Ramesh Chandra, Thermoelectric Properties of Two-Phase PbTe with Indium Inclusions, *J. Electronic Materials* 43, 1630 (2014).
35. Kole M., Dey T. K., Effect of Aggregation on the Viscosity of Copper Oxide-Gear Oil Nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 50(9), 174 (2011).
36. Kole M., Dey T. K., Thermal Conductivity and Viscosity of Al_2O_3 Nanofluid Based on Car Engine Coolant, *J. Physics D: Applied Physics* 43(31), 315501 (2010).
37. Das S., Dey T. K.. Electrical Conductivity and Low Field Magnetoresistance in Polycrystalline $La_{1-x}K_xMnO_3$ Pellets Prepared by Pyrophoric Method, *Solid State Communications* 134(12), 237 (2005).
38. Kole M., Dey T.K.. Investigation of Thermal Conductivity, Viscosity, and Electrical Conductivity of Graphene Based Nanofluids, *J. Applied Physics* 113(8), 084307 (2013).
39. Battabyal Manjusha and Dey T. K.. Seebeck Coefficient in Polycrystalline $La_{0.7}Sr_{0.3-x}Ag_xMnO_3$ Pellets: Analysis in Terms of a Phase Separation Model, *J. Phys: Condensed Matter* 18, 493 – 505 (2006).
40. Battabyal Manjusha and Dey T. K., Seebeck Coefficient in Polycrystalline $La_{0.7}Sr_{0.3-x}Ag_xMnO_3$ Pellets: Analysis in Terms of a Phase Separation Model, *J. Phys: Condensed Matter* 18, 493 (2006).
41. Ponnambalam V., Varadaraju U.V., High-Temperature Resistivity and Thermopower Studies on Substituted Bi-2212 and Bi-2201 Systems, *Physica C: Superconductivity and Its Applications* 227(1-2), 102 (1994).
42. Perumal S., Gorsse S., Ail U., Chevalier B., Decourt R., and Umarji A. M., Effect of Co-substitution of Mn and Al on Thermoelectric Properties of Chromium Disilicide, *J. Materials Science* 22748 (2013).
43. Perumal S., Gorsse S., Ail U., Chevalier B., Decourt R., and Umarji A.M.. Effect of Composition on Thermoelectric Properties of Polycrystalline $CrSi$, *J. Electronic Materials* 1042, 42 (2013).
44. Perumal S., Gorsse S., Ail U., Prakasam M., Chevalier B., and Umarji A.M.. Thermoelectric Properties of Chromium Disilicide Prepared by Mechanical Alloying, *J. Materials Science* 6018, 48 (2013).
45. Sivaprahasam D., Bouchard E., and Gopalan R., Processing of Nanopowders of $FE-Co-Sb$ Alloy by RF Plasma Technique for Thermoelectric Applications, *Materials Lett.* Submitted
46. Sivaprahasam D., Gopalan R., and Sundararajan G., Nanocrystalline Fe-Co-Sp Thermoelectric Alloy Powder by RF Plasma Technique, *J. Alloys and Compounds*, - Shortly to be submitted.
47. Subramaniam H., Sivaprahasam D., Battabyal M., and Gopalan R.. Phase Stability and Thermoelectric Properties of $Cu_{10.5}Zn_{1.5}Sb_4S_{13}$ Tetrahedrite, *J. Alloy Comp.* 667, 323 (2016).
48. Battabyal M., Priyadarshini B., Sivaprahasam D., Karthiselva N S., and Gopalan R.. The Effect of Cu_2O Nanoparticle Dispersion on the Thermoelectric Properties of n -type Skutterudites, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 48, 455309 (2015).
49. Rawat P. K., Paul B., and Banerji P.. Exploration of Zn Resonance Levels and Thermoelectric Properties in Iodine Doped $PbTe$ with $ZnTe$ Nanostructures, *ACS Applied Materials & Interfaces* 6, 39 – 95 (2014).

50. Kumar A., Rawat P.K., and Banerji P.. Carrier Transport Phenomenon and Thermoelectric Properties in Melt-Grown Tellurium Doped *n*-type $Bi_{0.88}Sb_{0.12}$ Alloy, *Materials Science & Engineering B* 186,112 (2014).
51. Rawat P. K., Paul B., and Banerji P. Nanotechnology, Thermoelectric Properties of $PbSe_{0.5}Te_{0.5}: x (PbI_2)$ with Endotaxial Nanostructures: a Promising *n*-type Thermoelectric Material, *Nanotechnology* 24, 215 – 401
52. Paul B. and Banerji P.. Enhancement of Thermoelectric Power Factor Through Modification of Electronic Structure in $PbTe:Cr$, *AIP Conf. Proc* 1349, 851 (2012).
53. Das Diptasikha, Malik K., Deb A. K., Dhara S., Bandyopadhyay S., and Banerjee Aritra. Defect Induced Structural and Thermoelectric Properties of Sb_2Te_3 Alloy, *J. Applied Physics* 118, 45 – 102 (2015).
54. Sharma V. K., Chattopadhyay M. K., Shaeb K. H. B., Chouhan A., Roy S. B., Chattopadhyay Kumar. Large Magnetoresistance in $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ Alloy, *Applied Physics Letters* **89**(22), 2509 (2006).
55. Kaur Kulwinder and Kumar Ranjan. Effect of Pressure on Electronic and Thermoelectric Properties of Magnesium Silicide: a DFT Study, *Chin. Phys. B* **25**(2), 056401 (2016).
56. Kaur Kulwinder and Kumar Ranjan. First Principle Investigation of the Electronic and Thermoelectric Properties of Mg_2C , *Chin. Phys. B* **25**(2), 026402 (2016).

Надійшла до редакції 15.01.2017