

*До нас в науку! Ми навчим,
Почому хліб і сіль почім!
«Прометей», Т.Г. Шевченко*

ВСТУПНЕ СЛОВО

Вашій увазі представлено результати досліджень авторського колективу, присвячені моделюванню та отриманню новітніх термочутливих матеріалів для виготовлення чутливих елементів перетворювачі температури. Сучасний рівень розвитку науки є основою для створення та освоєння принципово нових матеріалів високої якості, технологічності, ефективності, довговічності, безпеки та надійності у процесі експлуатації, що є пріоритетним напрямом фундаментальних та прикладних досліджень. До таких матеріалів відносяться описані нижче напівпровідникові термочутливі матеріали на основі фаз пів-Гейслера, що сьогодні використовуються, зокрема, як у первинних елементах термоелектричних генераторів (термоелектричні матеріали), так і чутливих елементах засобів вимірювання температури (термометричні матеріали).

Чому напівпровідникові матеріали?

При використанні у вітках термоелементів металів або металічних сплавів не досягнути високої ефективності перетворення теплової енергії в електричну і значень термоелектричної добротності Z ($Z = \alpha^2 \cdot \sigma / \kappa$, де σ – питома електропровідність, α та κ – коефіцієнти термо-ерс та теплопровідності, T – температура). Також не отримати значних змін питомого опору $\rho(T)$ (термометри опору) чи коефіцієнта термо-ерс $\alpha(T)$ (термоелектричні термометри). Річ у тім, що у металах або металічних сплавах значення термо-ерс $\alpha(T)$ є малими, а зміна значень коефіцієнта теплопровідності $\kappa(T)$ та питомої електропровідності $\sigma(T)$ у силу сталості числа Лоренца не можуть суттєво змінити значення добротності Z . Саме тому використання напівпровідникових матеріалів дозволяє досягнути умови, за яких значення добротності Z та зміна з температурою значень питомого електроопору $\rho(T)$ чи термо-ерс $\alpha(T)$ будуть максимальними.

З появою перед науковцями нових завдань, пов'язаних, зокрема, із побудовою термоперетворювачів в одно- та двовимірних структурах, роботі в умовах космосу та реакторах термоядерного синтезу, виникає необхідність запровадження наукових досліджень із проблем, які формально належать до різних наук. Саме результати наукових досліджень, отримані на стиках кількох наукових напрямів, здатні забезпечити науково-технічний прорив як при перетворенні теплової енергії в електричну, так і в температурних вимірюваннях. Зауважу, що на таких підходах побудовано дослідження авторського колективу.

Використання новітніх результатів фізики конденсованого стану, сучасних методів дослідження структури речовини, її електронного спектру, фізичних властивостей дали змогу авторам зрозуміти, описати та використати фізичні процеси для моделювання й отримання лінійки принципово нових термочутливих матеріалів на основі фаз пів-Гейслера зі стабільними та відтворюваними

характеристиками у температурному діапазоні 4,2÷1500 К. До слова, саме в Україні, у Львівському національному університеті ім. І. Франка, започатковано у 80-х роках минулого століття системне дослідження напівпровідникових термочутливих матеріалів на основі фаз пів-Гейслера.

Українська школа *термоелектричного* матеріалознавства є визнаною у світі, а координацію робіт з дослідження та впровадження термоелектричних матеріалів здійснює Міжнародна термоелектрична академія під керівництвом її засновника, академіка НАН України, *Л.І. Анатичука* (м. Чернівці). Сьогодні одними з найбільш досліджуваних термоелектричних матеріалів у світових наукових центрах, які володіють високою ефективністю перетворення теплової енергії в електричну, є матеріали на основі фаз пів-Гейслера, зокрема, TiNiSn, ZrNiSn, HfNiSn, TiCoSb, VFeSb, ZrCoSb та RNiSb (R – рідкісноземельний метал), які кристалізуються у структурному типі MgAgAs. До слова, один з авторів представленої монографії увів для опису цих фаз термін «інтерметалічні напівпровідники», який сьогодні є загальноживаним.

Термоелектричні матеріали, отримані шляхом сильного легування фаз пів-Гейслера акцепторами і/або донорами ($N_A, N_D \approx 10^{19} \div 10^{21} \text{ см}^{-3}$), виявили високі значення термоелектричної добротності Z , які за температури $T=800 \text{ К}$ досягають значень $ZT \sim 1,4$, що відповідає кращим показникам матеріалів на основі телуридів, клатратів, скутерудитів тощо.

Широкого застосування набули також *термометричні* матеріали на основі фаз пів-Гейслера для виготовлення чутливих елементів термоелектричних та електрорезистивних термометрів, що дозволило розширити діапазон температурних вимірювань, підвищити чутливість та відтворюваність їхніх характеристик. Дані роботи було розпочато за підтримки проф. *Б.І. Стадника* (НУ «Львівська політехніка»), який поряд з член-кор. НАН України *О.А. Геращенком* (Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ), член-кор. РАН *І.І. Федиком* (НВО «Луч», м. Подольск, Росія), проф. *В.І. Лахом* (НВО «Термоприлад», м. Львів) та іншими науковцями стояв біля витоків розроблення науково-технічних засад температурних вимірювань в СРСР та Україні. А розроблені та виготовлені на НВО «Термоприлад» засоби вимірювання температури і нині успішно працюють у космосі, контролюють температуру в атомних реакторах, у нашому повсякденному побуті тощо.

Отримані авторами термочутливі матеріали вигідно відрізняються від відомих, зокрема, і напівпровідникових, простотою синтезу, не містять шкідливих, токсичних, радіоактивних та забруднюючих компонентів (Te, Se, Hg, Sr, Tl, Pb, Ge, As тощо), отримання та утилізація яких не пов'язана із забрудненням довкілля, а також високою стабільністю характеристик, стійкістю до стрімких змін температур у діапазоні до 1500 К. Оскільки фаза пів-Гейслера – хімічна сполука із трьох розповсюджених і недорогих металів, то це створює передумови для промислового отримання економічно доцільних термоелементів.

Утворення твердих розчинів заміщення на основі фаз пів-Гейслера дозволяє цілеспрямовано змінювати концентрацію носіїв струму та керувати положенням рівня Фермі ϵ_F , плавно змінюючи значення питомого опору ρ , коефіцієнтів

термо-ерс α та теплопровідності κ . У свою чергу, оптимізація електрокінетичних характеристик термоелектричних і/або термометричних матеріалів полягає саме в *одночасній зміні* концентрації носіїв електричного струму, їхньої рухливості, механізмів розсіювання, інтервалу температур, вибору кристалографічної орієнтації тощо, що приведе до збільшення значень термо-ерс чи електроопору при збереженні їх однозначної залежності. Для отримання високих значень термоелектричної добротності необхідно також зменшити теплопровідність матеріалу.

Можу стверджувати, що своїми науковими здобутками автори вивели формулу успішності науковця або, як прийнято зараз наголошувати, формулу «високої капіталізації» результатів наукових досліджень. Це – **міжнародна науково-технічна кооперація з науковцями провідних світових дослідницьких центрів**.

У даному контексті необхідно зазначити, що для авторів важливою, а за деякими напрямками і визначальною, була і залишається кооперація в експериментальних та теоретичних дослідженнях з науковцями Віденського класичного та технічного університетів, Інституту досліджень твердих тіл та матеріалів ім. Лейбніца (м. Дрезден, Німеччина), Національного центру наукових досліджень (CNRS) та університету ім. Дж. Фур'є (м. Гренобль, Франція), Лабораторії Еймса університету штату Айова (м. Еймс, США), Інституту низьких температур та структурних досліджень ім. В. Тшебетовського ПАН (м. Вроцлав, Польща), Інституту фізики ім. В.А. Фока Санкт-Петербурзького державного університету (м. Санкт-Петербург, Росія), Науково-технологічного університету Гірничо-металургійної академії (м. Краків, Польща) тощо.

Автори свідомі того, що у монографії наведено широкий спектр результатів наукових досліджень, які відносяться до різних наук, а це дещо утруднює сприйняття викладеного матеріалу. Однак автори одностайні в думці, яку я повністю поділяю, що подальший розвиток науки та створення і освоєння принципово нової інформаційно-вимірювальної та мікро- і наносистемної техніки буде відбуватися саме на стиках наук завдяки запровадженню нових функціональних матеріалів, зокрема, термочутливих. Наукові здобутки авторів наочно демонструють дану тезу.

Віталій Бабак, член-кор. НАН України,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
м. Київ, січень 2020 р.