

Грессленер К.Г.<sup>1,4</sup>,  
Крен М.<sup>1</sup>,  
Керепезі П.<sup>2</sup>,  
Гупфінгер Л.<sup>1</sup>,  
Гьоглінгер М.<sup>3</sup>,  
Целлінгер П.<sup>1,4</sup>,  
Планк Б.<sup>3</sup>,  
Байштайнер Х.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Університет Йоганна Кеплера, Лінц (Австрія);  
*e-mail: karl-heinz.gresslehner@kl-met.com*

<sup>2</sup>Група EVG. St. Florian / Inn (Австрія);

<sup>3</sup>Університет прикладних наук Верхньої Австрії, Вельс (Австрія);

<sup>4</sup>K1-MET GmbH, Лінц (Австрія);

<sup>5</sup>Beisteiner Printronics, Ройтам (Австрія)

## НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ МЕТОДОМ СКАНУЮЧОЇ АКУСТИЧНОЇ МІКРОСКОПІЇ

У цій роботі ми представляємо потенціальну скануючу акустичну мікроскопію (SAM) як важливий метод неруйнівної оцінки (NDE) для контролю процесів, а також аналізу несправностей термоелектричних модулів (TE-M). SAM є частиною так званої “Концепції команди мрії”, яка детально описана в розділі 2.

**Ключові слова:** термоелектричні модулі, неруйнівне дослідження, скануюча акустична мікроскопія

### Вступ

Було продемонстровано, що термоелектричні генератори (ТЕГ) є багатообіцяючою технологією для перетворення будь-якого виду відпрацьованого тепла безпосередньо в дороговартісну електричну енергію. Це твердотільні пристрої, переваги яких полягають в тому, що вони не мають рухомих частин, робочих рідин, не потребують зовнішньої енергії, мають низькі витрати на обслуговування, легку масштабованість, безшумну роботу та тривалий термін служби. На рис. 1.1 показана схема ТЕ-модуля. Типовий ТЕГ складається з більш ніж сотні термоелектричних елементів (віток) з матеріалів *n*- та *p*-типу, які електрично з'єднані послідовно та термічно паралельно, та розташовані між двома керамічними шарами. Деталі наведені на рис. 1.2.

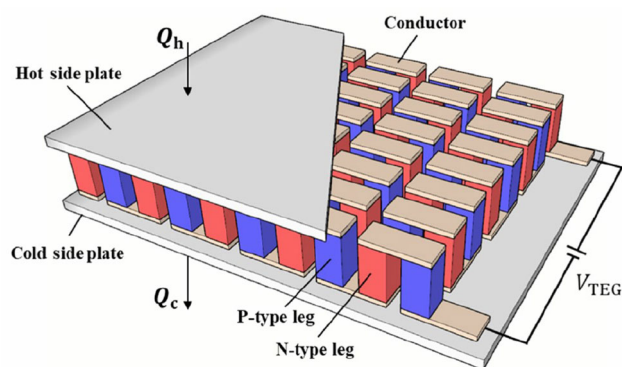


Рис. 1.1. Огляд схеми ТЕГ [1]

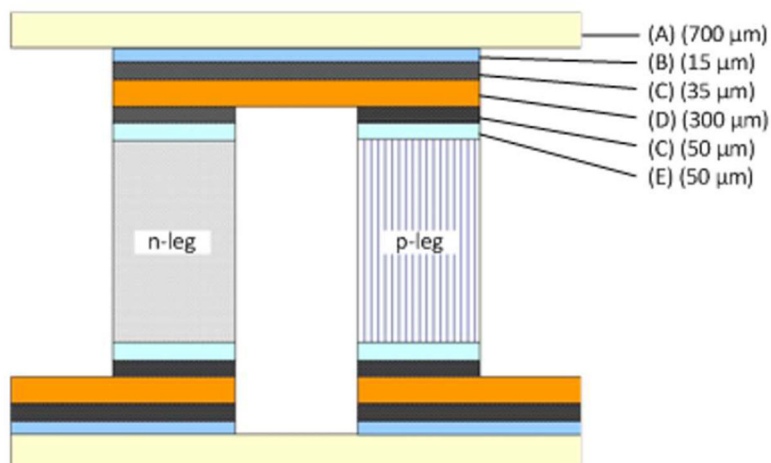


Рис. 1.2. Ескіз шарової структури термоелектричної пари в ТЕ-модулі. Типова товщина шару наведена в дужках. (А) кераміка (700 мкм). (В) металізація (15 мкм). (С) пайка 35 мкм). (D) Si-електрод (300 мкм). (E) дифузійний бар'єр (50 мкм)

## II. Техніка забезпечення надійності

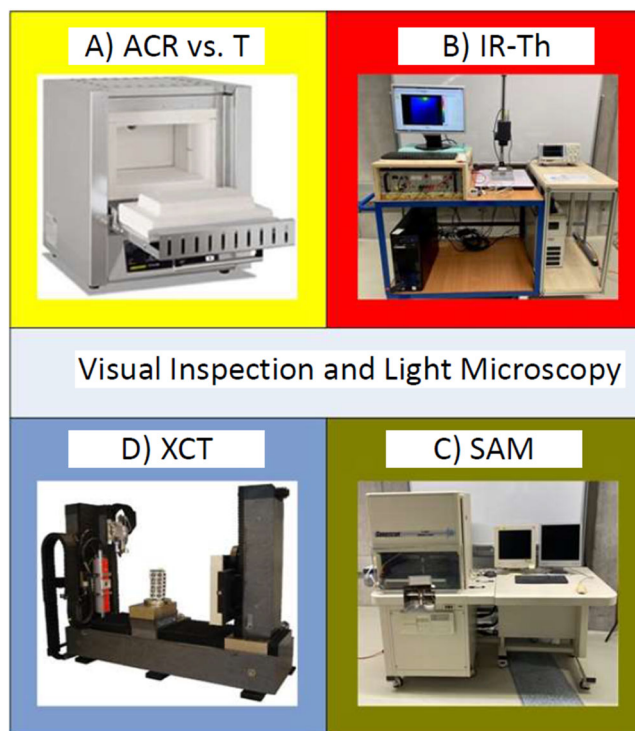


Рис. 2.1. «Концепція команди мрії щодо методів NDE» або «Чарівний квартет методів NDE»:  
(А) Високотемпературна піч для вимірювання загального опору змінному струму (ACR) від  $T$ . Температурна залежність ACR є показником довгострокової стабільності ТЕ-модуля ([2] – [5]).  
(В) Випробувальний стенд ІЧ-термографії для виявлення підповерхневих дефектів («слабкі відмови»).  
(С) Скануючий акустичний мікроскоп (SAM) для виявлення підповерхневих дефектів («слабкі пошкодження», а також «сильні пошкодження»). SAM детально описано в розділах III і IV.  
(D) Рентгенівська томографія (XCT) є важливим доповненням до аналізу SAM і дозволяє безпосередньо візуалізувати внутрішні структури ТЕ-модуля

Таблиця 1 показує застосовність різних методів NDE для виявлення слабких і важких відмов.

*Таблиця 1*

*Концепція команди мрії*

Тип відмови	ACR vs. T	IR-Th	SAM	ХСТ
Слабкі пошкодження (струм може текти)	×	×	×	×
Сильні пошкодження (струм не може текти)			×	×

При перенесенні термоелектрики з лабораторних масштабів у промислові застосування, дуже важливо, щоб її позитивні властивості, такі як відсутність рухомих частин, легка масштабованість тощо, могли бути повністю використані завдяки високій довгостроковій стабільності. Надійність і продуктивність ТЕ-модуля суттєво залежить від якості спаїв термоелементів [1]. Таким чином, розробка надійності відіграє важливу роль, завдяки чому необхідно провести відповідні стрес-тести та проаналізувати дефектні ТЕ-модулі на предмет їхньої несправності за допомогою методів неруйнівної (NDE) та деструктивної оцінки (DE). У цьому контексті аналіз відмов (FA) є ключовим методом у розробці надійності, який має на меті визначити першопричину неправильної поведінки ТЕ-модуля. FA виконується в кілька етапів, де основна увага повинна бути приділена технологіям NDE. Як загальне правило для виконання аналізу відмови: NDE має проводитись перед DE.

Під час аналізу відмов ТЕ-модулів практично можна грубо розрізнити два типи відмов, а саме «слабкі відмови» та «важкі відмови» (див. таблицю на рис. 2.1). «Слабка відмова» означає, що ТЕ-модуль працює, але не відповідає специфікації, наприклад, через підвищений внутрішній електричний опір (ACR). «Важка відмова» означає, що ТЕГ повністю непрацездатний, тобто. струм не може протікати через зламану вітку, внутрішні тріщини тощо. Як початкову процедуру для перевірки ТЕ модулів ми встановили так звану «Концепцію команди мрії щодо методів NDE» (також відому як «Чарівний квартет методів NDE»), яка проілюстрована на рис. 2.1.

### III. Основні принципи SAM

Принцип роботи SAM полягає у зв'язку акустичної хвилі з поверхнею зразка за допомогою ультразвукового перетворювача та аналізі відбитого ехосигналу (рис. 3.1 а) [6, 7]. Ця технологія відома як режим відбиття або відлуння імпульсу. Щоб мінімізувати втрати сигналу, зразок занурюють у водяну баню. Коли акустична хвиля поширюється крізь зразок, вона може розсіюватися, поглинатися, відбиватися або передаватися через межі середовищ. Відбитий ультразвуковий імпульс можна аналізувати різними режимами сканування (рис. 3.1 б, с) [6].

Полярність і амплітуду  $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$  відбитої хвилі отримують із акустичних опорів  $Z_i = \rho_i$  (щільність)  $\times C_i$  (швидкість звуку) суміжних матеріалів, де  $Z_i$  є акустичним аналогом показника заломлення в оптичній мікроскопії. На рис. 3.1 с показано С-скановане зображення мікросхеми в пластиковій упаковці з аналізом полярності, де жовті та червоні області вказують на розшарування ( $R < 0$ ), а сіра область вказує на хороший зв'язок ( $R > 0$ ).

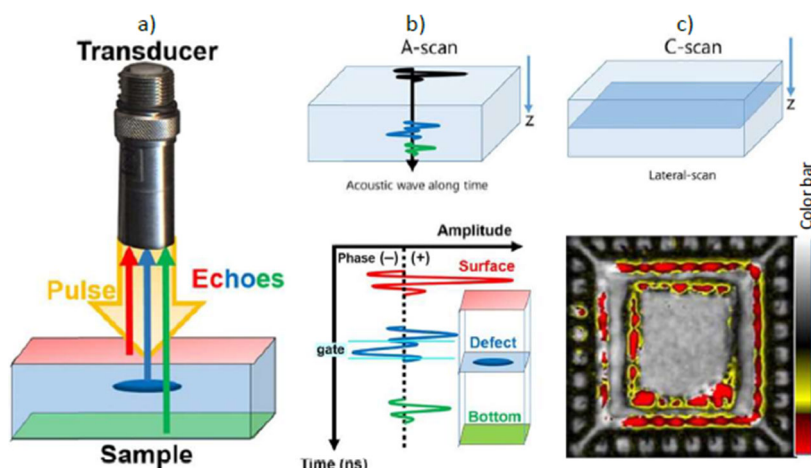


Рис. 3.1. Принцип роботи SAM: а) падаючий і відбитий ультразвуковий імпульс. б) відповідні амплітуди відбитих луна-сигналів, створених A-Scan. A-Scan забезпечує «осцилографічний дисплей» інформації про вертикальну лінію через глибину зразка в заздалегідь визначеній точці на поверхні. Він відображає піки на межах розділу, що виникають у момент часу, пропорційний їх глибині. в) C-Scan забезпечує відображення відеозображення горизонтального поперечного перерізу зразка на заданій глибині, на якій фокусується перетворювач і розташований затвор (джерело: [8]). Положення затвору визначає конкретну глибину ехосигналу, а ширина затвору (яскраво-сині вертикальні лінії в б)) – роздільну здатність по глибині. Жовтий і червоний кольори на зображенні C-сканування вказують на негативну полярність амплітуди відбитого сигналу ( $R < 0$  або  $Z_2 < Z_1$ ), тоді як сірий колір вказує на позитивне відлуння ( $R > 0$  або  $Z_2 > Z_1$ ) (див. кольорову смугу)

#### IV. Аналіз ТЕ-модуля

Показано процедуру вхідної перевірки комерційно доступного ТЕ-модуля на основі *BiTe* при 200 °C #ALI\_2305\_01\_06. Для цього ми використали: IR-Th (вимірювання, а також числове моделювання), SAM та поперечний переріз. Вимірювання ACR і ХСТ тут не обговорюються.

#### ІЧ-термографія

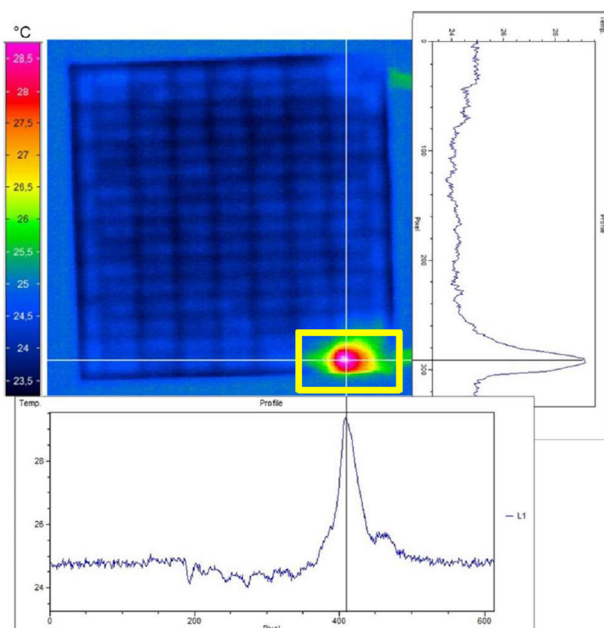


Рис. 4.1 а. Виявлення гарячої точки поблизу позитивної клеми ТЕ-модуля. Щоб краще локалізувати місце руйнування, було виконано лінійне сканування в напрямку  $x$  та  $y$  для подальшого поперечного перерізу

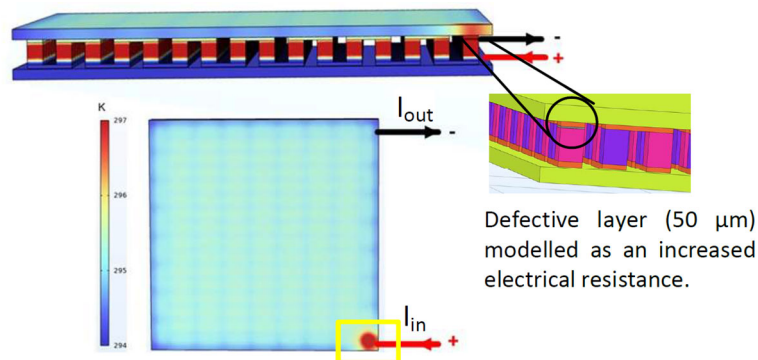


Рис. 4.1 б. Чисельне моделювання розподілу температури з такими параметрами: Модуль ТЕ працює як тепловий насос з використанням ефекту Пельтьє. Струм  $I_{in}$  було встановлено на 3 А, що є типовим значенням для ІЧ-термографії. Для охолодженої сторони була прийнята постійна температура  $T = 293.15$  К. Розсіювання тепла від верхньої сторони (сторони ІЧ-камери) до навколишнього середовища ( $T = 293.15$  К) було змодельовано як конвективний тепловий потік з коефіцієнтом теплопередачі  $h = 6$  Вт/м<sup>2</sup>·К

### Скануюча акустична мікроскопія та поперечний переріз

На рис. 4.2 а, б показано обладнання SAM, що використовується для ультразвукового аналізу TE-модулів разом із відповідними даними перетворювача.

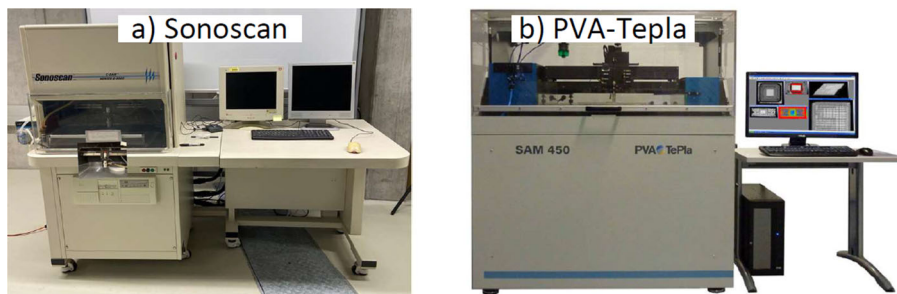


Рис. 4.2. Обладнання SAM, що використовується для ультразвукового аналізу TE модулів

Таблиця 2

Основні параметри перетворювачів

Обладнання SAM \ дані перетворювача	$f$ [MHz]	$FL$ [mm]	$D$ [mm]	$F\#$ [mm]	Розмір плями [μm]	$\Delta z$ [μm]	$DOF$ [mm]
C-SAM Sonoscan D-9000	100	12.7	6.4	2	36.6	25.9	0.43
PVA Tepla SAM 450	87	8	2.0	4.0	3.0	13.7	0.07

$f$  – центральна частота;  $FL$  – фокусна відстань;  $D$  – діаметр;  $F\#$  –  $FL / D$  –  $f$ -число, яке вказує на кількість звуку, що проходить через лінзу; розмір плями –  $2 \times$  бокова роздільна здатність;  $\Delta z$  – осьова роздільна здатність;  $DOF$  – глибина фокусу = глибина проникнення.

На рис. 4.3 а показано рефлексграму А-Scan (блакитна суцільна лінія), виміряну приблизно у центрі ТЕ модуля (білий квадрат) і його перетворення Гільберта (червона пунктирна лінія). Перетворення Гільберта є важливим для визначення піку імпульсу в часовій області для вимірювання часу польоту (TOF) [9]. TOF було обрано як 9.9 мкс, що відповідає глибині фокусу ( $DOF$ ) на межі  $Cu$ -електрод/припій (див. шари D/C у вставці). Піки імпульсу були виявлені на чотирьох інтерфейсах, де TOF відповідають таким шарам: (1) – (2) кераміка (А), (2) – (3)  $Ni$

покриття (В) і пайка (С) і (3) – (4) *Cu*-електрод (D). Жовтий прямокутник вказує на розташування гарячої точки (Рис. 4.1 а), а зелений прямокутник показує область, де показано детальне зображення C-Scan на Рис. 4.3 б.

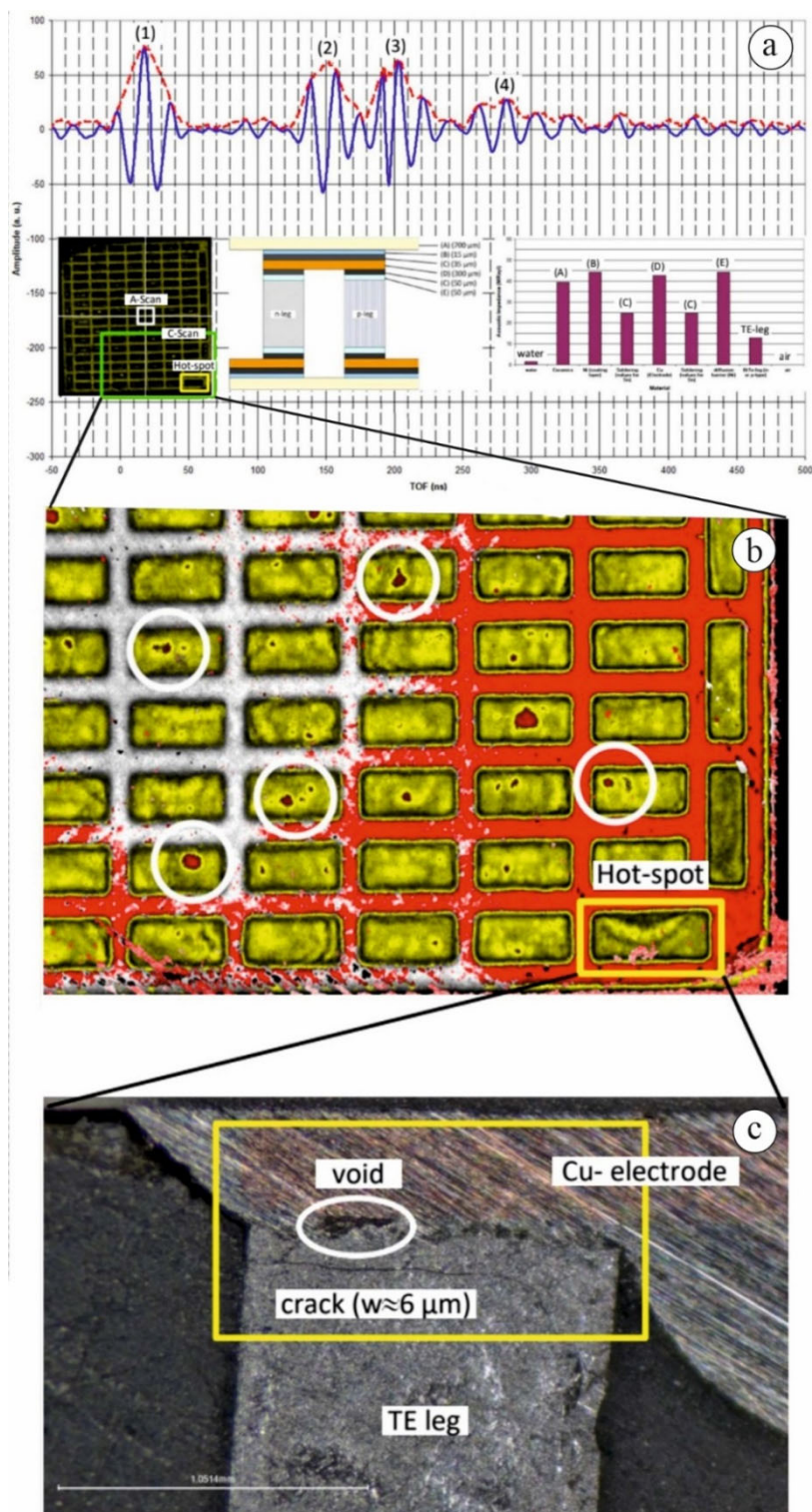


Рис. 4.3. TE-Module #ALI\_2305\_01\_06: а – рефлектограма А-сканування за допомогою C-SAM Sonoscan D-9000 (рис.4.2 а); б – С-скан зображення за допомогою C-SAM Sonoscan D-9000 (рис. 4.2 а); в – світловий мікроскопічний аналіз після поперечного зрізу та полірування

На рис. 4.3 *b* показано зображення С-скану в місці гарячої точки (жовтий прямокутник на рис. 4.3 *a*). Параметри аналізу наведено на рис. 4.3 *a*. У місці гарячої точки можна побачити нерівності в контактному шарі (жовтий прямокутник). Червоні плями всередині білих кіл вказують на порожнечі (повітряні проміжки) у з'єднаних шарах D / C, або C / E або E / TE-вітка (див. рис. 1.2). Ці порожнечі, серед іншого, відповідають за підвищений електричний контактний опір, який може значно знизити довгострокову стабільність TE-модуля (особливо під час роботи при вищих температурах).

На рис. 4.3 *c* показано аналіз за допомогою світлової мікроскопії після поперечного зрізу та полірування. Час полірування становив 1 год із середньою швидкістю видалення приблизно 13 мкм/хв. Тріщина (повітряний зазор) у площині поперечного перерізу ніжки TE шириною прибіл. 6 мкм можна побачити. Це, швидше за все, причина гарячої точки, яка, ймовірно, виникла під час процесу пайки на плюсовій клемі.

Також порожнечі можна побачити на границях між *Cu*-електродом і матеріалами, що лежать під ним (білий еліпс), які вже можна було спостерігати в аналізі SAM (рис. 4.3 *b*).

## **Висновки**

- У цій роботі ми обговорили ефективність «концепції команди мрії» NDE, яка полягає в: вимірюванні ACR як функції температури, ІЧ-термографії, С-SAM і ХСТ.
- Переваги цих методів NDE: вони прості у використанні, немає або невелика потреба в підготовці зразка, і вони можуть дати результати дуже швидко.
- Результати методів NDE є важливою основою для подальшого руйнівного аналізу, такого як різання, поперечний переріз, полірування тощо, щоб визначити першопричину несправності TE-модулів.
- Тільки за допомогою цих методів можна буде правильно інтерпретувати результати тестів на надійність (стрес-тестів), щоб забезпечити довгострокову стабільність TE-модулів.
- Таким чином, щоб перенести термоелектрику з лабораторних масштабів на промислові, ці методи NDE і DE зроблять важливий внесок у процес і контроль продукту у виробництві TE-модулів.

## **Подяки**

Автори хочуть подякувати компаніям voestalpine Stahl GmbH і Energie AG Oberösterreich Umwelt Service GmbH за фінансову підтримку. Автори хотіли б подякувати Peltron GmbH Peltier-Technik за безкоштовне постачання термоелектричних модулів і підтримку в отриманні TE-модулів від інших постачальників, а також багато корисних обговорень.

Автори також хотіли б подякувати професору Армандо Растеллі та професору Стефану Мюллеггеру з Інституту фізики напівпровідників і твердого тіла / JKU за використання їхнього обладнання для аналізу несправностей. І останнє, але не менш важливе, автори хотіли б подякувати Е. Нуско з Інституту фізики напівпровідників і твердого тіла / JKU та А. Німмерволла з Інституту прикладної фізики / JKU за технічну підтримку.

## **Література**

1. Chae H., et al., Feasibility study on energy harvesting with thermoelectric generators in a photovoltaic-ground source heat pump system, *Energy Reports*, 11 (2024).

2. Chen M., Note: Extraction of temperature-dependent interfacial resistance of thermoelectric modules, *American Institute of Physics* (2011).
3. Semenyuk V., et al., Diffusion Protection of Thermoelectric Cooler Junctions as a Means of Increasing its Reliability, *Proc. of 5<sup>th</sup> European Conference on Thermoelectrics*, September 10–12, 2007, Odessa (2007).
4. Liu W., et al. (2013). Understanding of the contact of nanostructured thermoelectric *n*-type  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$  legs for power generation applications, *J. Mater. Chem. A*.
5. Liu W., et al. (2019). Thermoelectric interface materials: A perspective to the challenge of thermoelectric power generation module, *Journal of Materiomics*, 5 (3).
6. Yu H. (2020). Scanning acoustic microscopy for material evaluation, *Appl. Microsc.*, 50, 25.
7. Su L., et al. (2013). Defect Inspection of Flip Chip Solder Bumps Using an Ultrasonic Transducer, *Sensors*, 13.
8. Sonolab, Introduction to Acoustic Micro Imaging, training materials (no date).
9. Mesquita L.V., Failure Analysis of PV Modules using Scanning Acoustic Microscopy, *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, Master Thesis (2019).

Надійшла до редакції: 15.07.2024.

**K.H. Gresslehner<sup>1,4</sup>**

**M. Krenn<sup>1</sup>**

**P. Kerepesi<sup>2</sup>,**

**L. Gupfinger<sup>1</sup>,**

**M. Höglinger<sup>3</sup>,**

**P. Zellinger<sup>1,4</sup>,**

**B. Plank<sup>3</sup>,**

**Ch. Beisteiner<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Johannes Kepler University, Linz (Austria)

*e-mail: karl-heinz.gresslehner@k1-met.com*

<sup>2</sup>EVG Group. St. Florian / Inn (Austria)

<sup>3</sup>University of Applied Sciences Upper Austria, Wels (Austria)

<sup>4</sup>K1-MET GmbH, Linz (Austria)

<sup>5</sup>Beisteiner Printronics, Roitham (Austria)

## **NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF THERMOELECTRIC MODULES BY SCANNING ACOUSTIC MICROSCOPY**

*In this work we present the potential of Scanning Acoustic Microscopy (SAM) as an important non-destructive evaluation (NDE) method for process control as well as failure analysis of thermoelectric modules (TE-modules). SAM is one part of the so called 'Dream Team Concept' which is described in detail in section 2.*

**Keywords:** thermoelectric modules, non-destructive inspection, scanning acoustic microscopy

## References

1. Chae H., et al., Feasibility study on energy harvesting with thermoelectric generators in a photovoltaic-ground source heat pump system, *Energy Reports*, 11 (2024).
2. Chen M., Note: Extraction of temperature-dependent interfacial resistance of thermoelectric modules, *American Institute of Physics* (2011).
3. Semenyuk V., et al., Diffusion Protection of Thermoelectric Cooler Junctions as a Means of Increasing its Reliability, *Proc. of 5<sup>th</sup> European Conference on Thermoelectrics*, September 10–12, 2007, Odessa (2007).
4. Liu W., et al. (2013). Understanding of the contact of nanostructured thermoelectric *n*-type  $Bi_2Te_{2.7}Se_{0.3}$  legs for power generation applications, *J. Mater. Chem. A*.
5. Liu W., et al. (2019). Thermoelectric interface materials: A perspective to the challenge of thermoelectric power generation module, *Journal of Materiomics*, 5 (3).
6. Yu H. (2020). Scanning acoustic microscopy for material evaluation, *Appl. Microsc.*, 50, 25.
7. Su L., et al. (2013). Defect Inspection of Flip Chip Solder Bumps Using an Ultrasonic Transducer, *Sensors*, 13.
8. Sonolab, Introduction to Acoustic Micro Imaging, training materials (no date).
9. Mesquita L.V., Failure Analysis of PV Modules using Scanning Acoustic Microscopy, *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, Master Thesis (2019).

Submitted: 15.07.2024.