

Avant-propos

Hiroyuki AKINAGA¹, Atsuko KOSUGA² et Takao MORI^{3,4}

¹ AIST, Tsubuka, Japon

² OMU, Osaka, Japon

³ NIMS, WPI-MANA, Tsukuba, Japon

⁴ Université de Tsukuba, Tsubuka, Japon

Les matériaux thermoélectriques peuvent être utilisés dans des dispositifs à l'état solide (c'est-à-dire des générateurs thermoélectriques) pour convertir la chaleur en électricité. Ils présentent donc un grand intérêt potentiel pour la conversion de la chaleur perdue afin d'économiser de l'énergie et en tant que sources pratiques et sans entretien pour alimenter le très grand nombre de capteurs de l'Internet des objets (IoT). C'est dans ce contexte que l'édition en deux volumes de *Micro-nano générateurs thermoélectriques* a été réunie, afin de constituer un ensemble important et complet d'ouvrages englobant les principes fondamentaux, les avancées de l'état de l'art et les perspectives de ce sujet comme indiqué dans l'avant-propos de *Micro-nano générateurs thermoélectriques 1*. Le volume 1 traitait principalement de la physique fondamentale, des matériaux et des mesures thermoélectriques.

Dans ce volume 2, nous traiterons principalement des défis et des perspectives, notamment en ce qui concerne les dispositifs et les applications thermoélectriques, tout en introduisant également quelques tentatives non conventionnelles. Comme nous l'avons présenté dans le volume 1, les performances des matériaux thermoélectriques ont considérablement progressé ces dernières années, tout comme le développement de matériaux élémentaires durables et abondants. Plusieurs aspects doivent encore être abordés afin d'amener les matériaux thermoélectriques à des applications viables de conversion d'énergie. Il s'agit notamment de diverses considérations liées aux dispositifs telles que la durabilité, le traitement, la conception et l'identification d'applications appropriées.

Ces aspects sont abordés dans ce volume. Après une brève introduction sur le paysage des générateurs thermoélectriques dans les technologies de récupération d'énergie par plusieurs éditeurs, un chapitre complet intitulé « Fiabilité et durabilité des matériaux et dispositifs thermoélectriques » (chapitre 1) est présenté par Congcong Xu, Hongjin Shang, Zhongxin Liang, Fazhu Ding et Zhifeng Ren. Ils présentent en détail plusieurs questions clés pour combler le fossé entre la recherche thermoélectrique fondamentale et la mise en œuvre réussie des applications thermoélectriques. Tout d'abord, ils passent en revue la stabilité thermique de plusieurs matériaux thermoélectriques importants, durables, à haute performance et de nouvelle génération, à savoir le type $Mg_3(Sb, Bi)_2$, Zn_4Sb_3 , les skutterudites, les chalcogénures de cuivre, ainsi que GeTe, qui peut être considéré comme le remplaçant sans plomb de PbTe. Ils analysent les problèmes de stabilité thermique ou matérielle et donnent des pistes pour améliorer la stabilité. Deuxièmement, dans la section principale, ils présentent une analyse détaillée de la conception des dispositifs thermiques, car il est extrêmement important de construire des dispositifs qui soient thermiquement et mécaniquement fiables. Ils prennent en compte les contraintes thermiques telles que les cycles thermiques et les chocs, les problèmes d'interface tels que le contact, les couches barrières, les technologies d'assemblage, etc. Ils donnent des lignes directrices complètes pour des conceptions et des stratégies particulières afin de résoudre ces problèmes. Enfin, ils présentent plusieurs études de cas détaillées de modules thermoélectriques.

Le chapitre 2, rédigé par Chenguang Fu, Chaoliang Hu, Qi Zhang, Airan Li et Tiejun Zhu, traite de l'effet de la microstructure sur la compréhension des propriétés électroniques des matériaux complexes. Comme indiqué dans le volume 1, la microstructure s'est avérée être une méthode très puissante pour diffuser sélectivement les phonons et améliorer le facteur de mérite zT . Dans ce chapitre, les auteurs se concentrent sur les effets détaillés de cette micro-structuration sur les propriétés électroniques qui sont moins bien établies. Ils montrent comment obtenir un aperçu de ces effets à partir des données expérimentales du coefficient Seebeck, de la conductivité électrique et de la mobilité, et discutent des stratégies permettant de minimiser les effets néfastes sur le transport électronique des défauts ponctuels, de la texturation des joints de grains, etc., qui sont importants pour une diffusion efficace des phonons. Les trois chapitres suivants couvrent le développement de nouveaux systèmes/mécanismes.

Olga Caballero-Calero et Marisol Martín-González passent en revue les développements dans le domaine des nanofils thermoélectriques (chapitre 3). Les nanofils présentent un intérêt à la fois pour les aspects thermoélectriques et pour la conductivité thermique. Le célèbre effet de confinement quantique proposé par Hicks et Dresselhaus vise particulièrement les nanofils, puisqu'il a été proposé que dans les nanostructures de faible dimension, les caractéristiques pointues de la dérivée énergétique de la densité d'états puissent être utilisées pour améliorer le coefficient Seebeck. En outre, la nano-

structure pourrait réduire la conductivité thermique. Les auteurs présentent ici de manière exhaustive les méthodes de fabrication, les mesures et les propriétés thermoélectriques des nanofils d'une grande variété de matériaux. Ils traitent également des dispositifs à base de nanofils et des perspectives pour ces matériaux et dispositifs morphologiques.

Sylvie Hébert, Ramzy Daou et Antoine Maignan traitent de l'impact du dopage chimique ou du magnétisme dans les sulfures thermoélectriques modèles (chapitre 4). Ils se concentrent en particulier sur la stratégie d'intercalation dans le sulfure lamellaire TiS_2 et, de manière générale, sur le rôle que le magnétisme peut jouer dans l'amélioration du coefficient Seebeck. Après les oxydes, les sulfures constituent un terrain de jeu intéressant où le magnétisme peut jouer un rôle direct dans l'amélioration de la partie entropique du coefficient Seebeck par exemple. Un tel mécanisme est au moins partiellement indiqué pour le spinelle CuCrTiS_4 ainsi que le CoS_2 dopé, qui, lui, présente une dépendance intéressante à la polarisation du spin.

En rapport avec le thème du magnétisme et de la thermoélectricité, Akito Sakai et Satoru Nakatsuji examinent au chapitre 5 la génération thermoélectrique utilisant l'effet Nernst anormal (ANE). Bien que l'effet Nernst anormal soit encore beaucoup plus faible que l'effet Seebeck, des progrès récents ont montré une forte augmentation de l'effet à partir de niveaux beaucoup plus faibles, et des mécanismes tels que la dépendance de la courbure de Berry, les points de Weyl, etc., sont de plus en plus clairs. Ce chapitre passe en revue cette physique fondamentale et couvre divers aimants topologiques tels que le semi-métal magnétique de Weyl, des exemples d'aimants de Weyl présentant des caractéristiques ANE prometteuses.

Dans le dernier chapitre de cette partie, Bin Xu, Harsh Chandra et Junichiro Shiomi ont rédigé un complément utile au chapitre précédent sur les effets de la microstructure sur le transport électrique, avec un examen complet de l'ingénierie des phonons (chapitre 6). Ils passent en revue les principes fondamentaux du transport des phonons, diverses méthodes de mesure et de calcul ainsi que l'ingénierie des phonons, notamment par le biais de superréseaux. Le chapitre met particulièrement l'accent sur la décomposition et l'analyse des propriétés anharmoniques des phonons qui conduisent à une faible conductivité thermique.

Les trois derniers chapitres traitent des dispositifs et des applications thermoélectriques. Le premier, rédigé par Slavko Bernik, ouvre cette partie en donnant une vue d'ensemble de l'état actuel des technologies et applications thermoélectriques et des perspectives (chapitre 7). En commençant par le contexte des applications thermoélectriques, l'auteur donne un large aperçu des différentes classes de matériaux et des discussions sur les considérations relatives à l'applicabilité, et va également dans le détail concernant la structure de base et les différentes exigences pour les dispositifs, y compris le facteur de

remplissage, l'intégration, l'emballage, etc., et les considérations pour les différentes gammes de puissance pour les applications. Sylvain Le Tonquesse, Mathieu Pasturel, Franck Gascoin et David Berthebaud écrivent un traité détaillé et pratique intitulé « Traitement des siliciures de métaux de transition thermoélectriques pour le développement de modules » (chapitre 8). Les siliciures de métaux de transition ont attiré l'attention parce que leurs performances thermoélectriques respectables, sans être révolutionnaires, sont renforcées en grande partie par le fait qu'il s'agit de matériaux très abondants, peu coûteux et dotés de propriétés mécaniques généralement bonnes. Les auteurs se concentrent en particulier sur les méthodes de synthèse et de traitement en vue d'être compatibles avec l'industrie, et sur le stade actuel de développement des composants et des dispositifs. Dans le dernier chapitre, Hirokuni Hachiuma présente un examen complet et détaillé des applications thermoélectriques dans le passé, le présent et l'avenir (chapitre 9). Il évoque tout d'abord les premiers développements du réfrigérateur et de la glacière thermoélectriques, qui ont donné lieu à diverses applications de refroidissement thermoélectrique et à une forte croissance du marché. L'auteur aborde ensuite les applications de production d'énergie thermoélectrique en cours de développement, dans des catégories telles que la récupération d'énergie, les sources d'énergie autonomes et la récupération de la chaleur perdue.

Ce deuxième volume sur les micro-nano générateurs thermoélectriques couvre de manière exhaustive les principes fondamentaux et les avancées les plus récentes dans le domaine des dispositifs thermoélectriques et en particulier des exigences applicatives des matériaux ainsi que plusieurs nouvelles orientations. Ce volume devrait être particulièrement utile aux nouveaux venus dans le domaine qui s'intéressent aux applications possibles, par exemple dans l'industrie, ou qui s'intéressent aux nouveaux sujets. Il devrait également être utile aux experts qui souhaitent obtenir des lignes directrices pour le développement avancé du transport électrique et thermique de divers matériaux, et maîtriser diverses exigences et stratégies pour les dispositifs et les applications. Cet ensemble de deux volumes couvre les principes fondamentaux, les questions pratiques et l'état de l'art dans le domaine de la thermoélectricité, ce qui devrait permettre à de nombreux lecteurs de l'étudier et de l'utiliser.