

**茨城大学重点研究**  
**「グリーンデバイス開発研究」**

**茨城大学工学部附属**  
**グリーンデバイス教育研究センター**

**2014年度**  
**報告書**

茨城大学重点研究プロジェクト「グリーンデバイス開発研究」  
平成 26 年度報告書刊行にあたって

プロジェクト代表 池田輝之

茨城大学グリーンデバイス教育・研究センターでは、低環境負荷社会の実現に向け、材料・デバイス・回路・分析・シミュレーション技術の英知を結集し、様々な人間の活動における省電力化、エネルギー利用の高効率化を目的とした研究を行っております。

本年度の研究成果は、主として、1) SiC 半導体の性能を生かした低損失インバータ実現のため新しいコンセプトの応力緩和機能を有する接合技術の開発、2) 熱安定性を維持しつつ高密度化・多値化への要求に柔軟に対応可能な磁壁移動型メモリの開発、3) 超伝導デバイスの開発、4) 高性能熱電素子の開発、及び 5) これらの研究開発を効率よく推進するための実験的、理論的支援ツールの開発から成ります。

研究を加速することは勿論、得られた成果を積極的に外部に発表するとともに、外部資金の獲得、メジャーな国際会議での講演、国内外一流学術誌における研究成果の発信を推進しております。その一方、茨城大学グリーンデバイス教育・研究センターを世の中に広く認知してもらうため、センター内の研究を融合した、さらに付加価値の高い新しい技術開発の可能性を探っております。

本年度におけるグリーンデバイス教育・研究センターの主な成果としては、成果報告書に加え、科研費、JST 等の外部資金が合計約 1 億 3 千万円、査読付学術論文が 13 編、国内外における研究発表が 57 件（うち、国際会議 18 件）などが上げられます。

H27 年度も、全力で研究開発に邁進して参ります。引き続き、ご指導・ご支援を賜りますようお願い申し上げます。

## －目次－

### 1. 研究報告

1. 「SiC インバータ用応力緩和型ボイドフリー高温ハンダ接合開発」  
(大貫仁、玉橋邦裕、菅原良孝、千葉秋雄、川上三雄、本橋嘉信)  
－1－
2. 「低消費電力磁気メモリの開発」  
(小峰啓史)  
－4－
3. 「超伝導デバイス開発研究」  
(島影尚)  
－6－
4. 「高性能熱電変換材料の開発」  
(池田輝之)  
－9－
5. 「ハイスループットな手法のための熱電材料の局所熱物性計測」  
(太田弘道)  
－11－
6. 「計算機支援によるグリーンマテリアル設計」  
(篠嶋妥)  
－15－

### 2. プロジェクト業績

業績一覧

－17－

## 1.研究報告

## SiC インバータ用応力緩和型ボイドフリー高温ハンダ接合開発

A Void Free and Low Thermal Stress High-Temperature Soldering Process for SiC Inverters

大貫 仁、玉橋邦裕、菅原良孝、千葉秋雄、川上三雄、本橋嘉信

茨城大学大学院理工学研究科

Jin Onuki, Kunihiro Tamahashi, Yoshitaka Sugawara, Akio Chiba, Mituo Kawakami,

and Yoshinobu Motohashi

Graduate School of Science and Technology, Ibaraki University

### 1.概要

SiC 半導体の性能を生かした低損失インバータを実現するため、超塑性現象を利用した新しいコンセプトの応力緩和機能を有するボイドフリーAl-Zn 合金ハンダ接合技術を開発した。

### 2.はじめに

地球温暖化を抑制する超低炭素社会を構築するためには、省エネ効果や CO<sub>2</sub> 排出抑制効果が大きい電気自動車およびハイブリッド車の大量市場投入が喫緊の課題となっている。このためには、現在の Si 半導体素子で構成するインバータに比べてその損失を約 1/4 に低減できる超低損失 SiC 半導体インバータの大量市場投入が不可欠の課題となる。Si 半導体素子は適用上限温度が 150℃と低いので、車載モーターを駆動する電力容量の大きいインバータでは発熱が大きく大型の冷却装置が必要になるとともに重さも大きくなるので、車の高速化・高燃費化の制約になるためである。これに対し、SiC 半導体は原理的には適用上限温度を 400℃以上にできるので冷却装置の大幅な小型・軽量化を図ることができる特長がある。SiC 半導体素子の性能や生産技術の改善は最近飛躍的に進み、量産に対応できる段階にきています。しかし、200℃以上の温度領域に適用可能なハンダ材料が未開発であったため、SiC 半導体インバータの市場への投入が進んでいない状況にあった。

### 3.新技術のコンセプトに基づく接合形成プロセス

図1にこれまでに開発されたハンダおよび本開発ハンダの適用可能温度範囲を示す。200℃以上の温度領域に適用可能なハンダ材料が未開発であることが分かる。

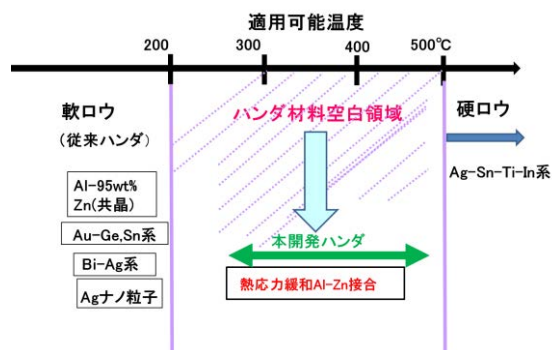


図1 これまでに開発されたハンダおよび本開発ハンダの適用可能温度範囲

まず、図2に示す Al-Zn 状態図および図3に示す接合プロセスの模式図において、(a) 接合部を 250℃に加熱・加圧して共析 22wt% (48at%) Al-Zn ハンダに超塑性現象を生じさせ、この時のハンダの展延性を利用して接合部界面の清浄化と密着性向上を促進する。続いて、(b) 昇温により 22wt% (48at%) Al-Zn ハンダを半熔融状態(450℃)にした後に冷却し、接合部に応力緩和機能を付与させるプロセスである。

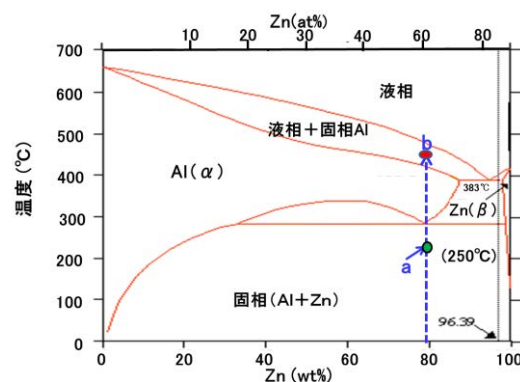


図2 Al-Zn状態図

本ハンダ接合をSiC高温半導体素子に適用することにより、接合部の熱応力歪に基づいて発生するSiC半導体素子中の積層欠陥や転位を著しく低減できSiC素子の低損失化が可能になる。

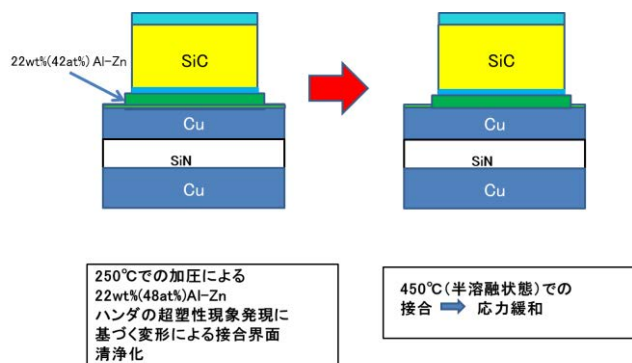


図3 接合プロセスの模式図

#### 4. 接合部の信頼性評価

図4は、上記接合プロセスにより作製したSiC半導体とCu/SiN/Cu絶縁基板とをAl-Znハンダで接合(以下SiC/Al-Zn/SiNと略称)したモジュールに、 $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $200^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で500サイクルおよび $50^{\circ}\text{C}$ ～ $300^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で1000サイクルの信頼性試験を実施した後の接合部の断面SEM像を示す。過酷な温度サイクル試験後も、ボイド等の無い健全な接合部が維持されていることが分かる。このようにSiC半導体素子ハンダ接合部のボイドやクラックの発生を抑制できるので、SiC半導体素子の電気抵抗や熱抵抗を低減でき低損失化できるとともに高信頼性を達成できると考えられる。

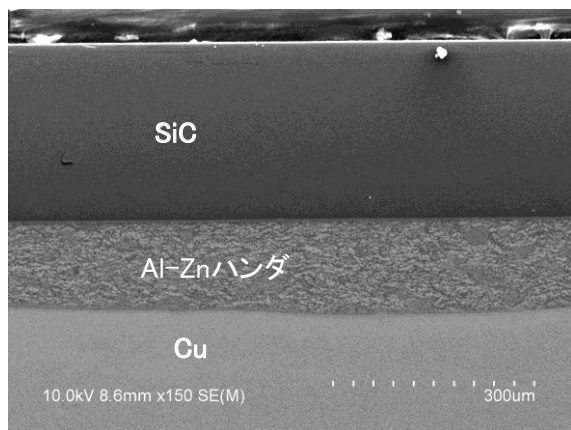


図4 SiC モジュール接合部の信頼性試験後の断面走査電子顕微鏡像

#### 5. SiC デバイス特性の動作温度依存性

SiC 半導体素子は原理的には  $400^{\circ}\text{C}$ 以上の高温でも動作できるが、周辺材料、特にハンダの耐熱性と信頼性による制約のために現在のSiC半導体の使用温度は $175^{\circ}\text{C}$ にとどまっている。現在のSiC半導体素子は図5の矢印実線で示すように長時間(10 時間)通電により内部抵抗が増加して順方向電圧が増加し、半導体性能の低下や経時劣化を発生する場合がある。これは図6に示すように通電により積層欠陥が増大し、この積層欠陥部分でキャリアが大量に消滅してしまうことが原因

であるが、図5に示すようにSiC半導体素子の動作温度を上げることで回復させることが期待できる。動作温度を $200^{\circ}\text{C}$ ～ $250^{\circ}\text{C}$ 程度まで上げると実用上問題のないレベルまで積層欠陥を無害化できキャリアの消滅を解消できるので、この点からも新開発技術によるハンダの耐熱性の向上は不可欠である。

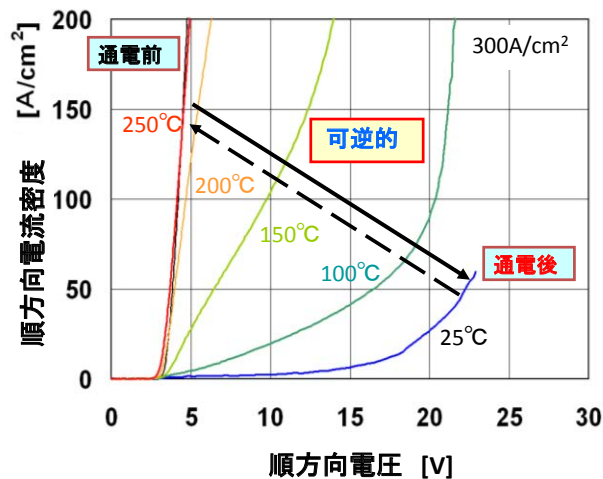


図5 長時間通電による SiC 半導体性能の劣化および動作温度の高温化による性能の回復

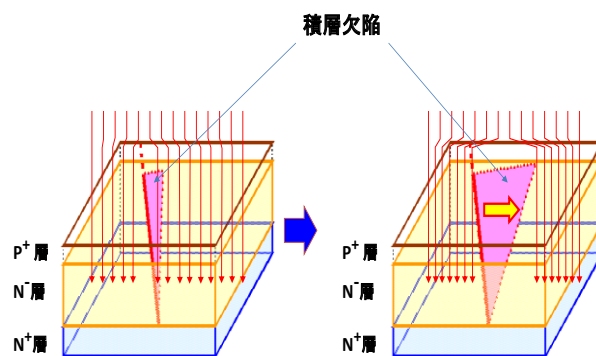


図6 通電による SiC 半導体中における積層欠陥の増大

#### 5. 結論

本開発技術によれば、使用温度が  $250^{\circ}\text{C}$ 以上と高くでき、且つ熱応力歪を従来ハンダに比べて大幅に緩和できるため $-40^{\circ}\text{C}$ ～ $300^{\circ}\text{C}$ の過酷な温度サイクルにも耐えることができる高温ハンダが実現でき、SiC半導体素子の損失増大や経時劣化を抑制し、半導体性能の革新を図ることができる。

#### 【参考文献】

- 1)日本経済新聞 2014 年 12 月 17 日
- 2)日刊工業新聞 2015 年 1 月 12 日
- 3)日刊工業新聞 2015 年 1 月 25 日

4)大貫 仁、玉橋邦裕、千葉秋雄他 3 名、合金接合材による接合層構造及びその形成方法、並びに該接合層構造を有する半導体装置及びその製造方法、特願 2014-203676

5) 大貫 仁、玉橋邦裕、千葉秋雄他 3 名、合金接合材による接合層構造及びその形成方法、並びに該接合層構造を有する半導体装置及びその製造方法、特願 2014-248826

# 低消費電力磁気メモリの開発

Fundamental study of non-volatile magnetic memory

小峰啓史

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

Takashi Komine

Green device education and research center, Ibaraki University

## 1.概要

本研究では、電流誘起磁壁移動の原理を用いた低消費電力磁気メモリの実現に向け、メモリ構造及び構成材料を検討している。本磁気メモリは、不揮発性に加えて、低消費電力、高速動作が実現可能な次世代メモリとして期待されている。本稿では、磁壁の高速動作に伴う諸問題を数値計算の観点から調べた結果を示す。結果として、電流印加の構造を工夫することによって、従来よりもさらなる高速動作が実現出来ることが示唆された。

## 2.はじめに

情報量の爆発的な増大から、情報機器の省電力化は急務の課題である。現在、低消費電力動作の観点から不揮発性メモリを混載した LSI の研究開発が検討されている。磁気を利用した不揮発性メモリはその候補の一つであり、最近 Everspin Technologies によってスピン注入型 MRAM (STTMRAM) が初めて製品化された。STTMRAM は、1T1MTJ から構成されるが、セル面積がフラッシュメモリなどに比べて大きく、高密度化、それに伴う熱安定性、また多値化への目処も立っていない。本研究では、熱安定性を維持しつつ高密度化・多値化への要求に柔軟に対応可能な磁壁移動型メモリの研究開発を行う。提案するメモリ構造を図 1 に示す。メモリ動作に必要なデータ転送層及びそのデータの熱安定性を確保する安定化層からなる構造を提案しており<sup>1)</sup>、本年度は、高速動作における磁壁駆動電流及び磁壁移動に伴う渦電流の影響を解析した。

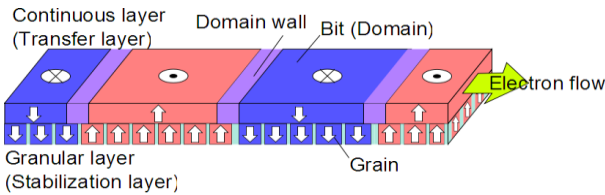


図 1 高密度化を可能にする二層構造セル

現在、開発を進めている磁壁移動型メモリは将来的には、スーパーハイビジョンに対応する 24Gbps を実現するためのものであり、磁壁の移動速度は数百 m/s から数千 m/s にも昇る。金属磁性体における磁化の高周波応答には、渦電流が大きな影響を及ぼすことが知られており、高速動作実現のための課題を整理する必要がある。本研究では、数値解析を行って、高速動作が磁壁速度に及ぼす影響を解析した<sup>2)</sup>。

## 3.高速磁壁移動に伴う古典電磁気の影響

磁壁移動に及ぼす磁場を Maxwell 方程式から導くと、駆動電流による磁場  $H_a$ 、磁壁移動に伴う渦電流磁場  $H_{eddy}$  の二つの代表的な効果がある。

$$H_a(r) = \frac{1}{4\pi} \int dr' \frac{j_a(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} \quad (1)$$

$$H_{eddy}(r) = \frac{1}{4\pi} \int dr' \frac{j_{eddy}(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} \quad (2)$$

ここで、 $j_a$ 、 $j_{eddy}$  はそれぞれ、駆動電流、渦電流であり、式(1)、(2)に基づいて、これらの磁場を数値的に解いた。これらの磁場は、磁壁に対するポテンシャルに相当し、磁壁に対するポテンシャルを計算して、磁壁の運動方程式を数値的に解いた<sup>3)</sup>。

磁壁の回転速度とポテンシャル強度の関係を図 2 に示す。従来、磁壁の回転運動が磁壁移動に及ぼす影響は明らかにされていなかったが、高速な磁壁回転は、角度に依存する粘性力になることが初めて明らかとなった。角度に依存するポテンシャルは磁壁の回転モードに影響を及ぼすため、今後、磁壁移動モードについても詳細に調べる必要がある。



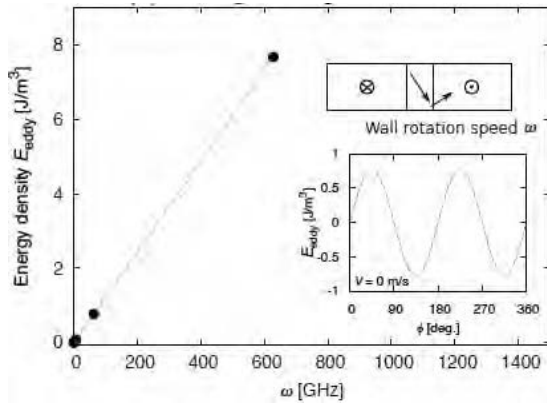


図2 渦電流ポテンシャルの磁壁角速度依存性

次に、駆動電流が磁壁移動に及ぼす影響を見積もるために、磁壁に対するポテンシャルの磁壁角度依存性を解析した。その結果を図3に示す。比較のため、従来知られていた困難軸異方性エネルギー  $E_m$  も同図に合わせて示した。現在、様々な研究機関で行われている実験は計算と同程度の駆動電流を用いており、古典電磁気が磁壁移動に及ぼす影響が無視できないことがわかる。

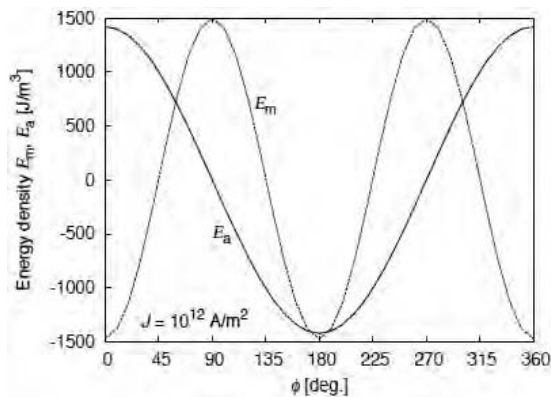


図3 磁壁に対するポテンシャルの磁壁角度依存性

これらの影響を加味して、計算した駆動電流と磁壁移動速度の関係を図4に示す。駆動電流  $J$  は、磁性体の物性値を用いて次のように速度の次元を持つ量に変換できる。

$$u = \frac{JPgu_B}{2eM_s}$$

ここで、 $P$ ,  $g$ ,  $\mu_B$ ,  $e$ ,  $M_s$  はそれぞれスピン分極率,  $g$  因子, ボア磁子, 電気素量, 飽和磁化である。また、磁壁移動速度はダンピング定数  $\alpha$ , スピントルクの非断熱係数  $\beta$  に関係することが知られており、実験的には  $\beta > \alpha$  とされている。そのため、解析では様々な定数の組み合わせを調べた。その結果、 $\beta > \alpha$  のときに古典電磁気による影響が磁壁移動速度を改善する傾向が得られた。速度の改善率は、低電流

密度でも、約20%程度であり、電流密度が高くなるにつれてその影響は顕著になる。

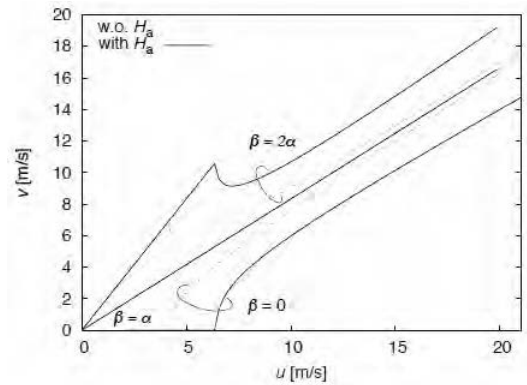


図4 駆動電流と磁壁移動速度の関係

#### 4. 結論

本研究では、磁壁移動型磁気メモリの高速化実現のため、高速動作が磁壁速度に及ぼす影響を数値解析した。その結果、駆動電流を工夫することによって、従来予測よりも20%程度磁壁速度を改善できる可能性を示唆した。最近、IBMのグループは実験的に数百 m/s の磁壁電流駆動に成功しており<sup>4)</sup>、本研究で提案した二層膜で構成されている。現在、駆動電流によるセルフアシスト効果を積極的に取り入れたメモリ構造を提案しており、材料、積層構造、メモリ構造を調整することで、さらに大きな情報転送レートが得られるものと期待される。

#### 【参考文献】

- 1) T. Komine *et al.*: Current-induced domain wall motion in a multilayered nanowire for achieving high density bit, *J. Appl. Phys.* Vol. 111, 07D314/pp.1-3 (2012)
- 2) T. Komine, T. Aono, and R. Ando: Influence of classical electromagnetic effect on current-induced domain wall motion in a perpendicularly magnetized nanowire, *J. Appl. Phys.* (2015) [in press]
- 3) A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat, and Y. Suzuki: Micromagnetic understanding of current-driven domain wall motion in patterned nanowires, *Europhys. Lett.*, Vol. 69, p. 990 (2005).
- 4) S.-H. Yang, K. -S. Ryu and S. Parkin: Domain-wall velocities of up to 750 m s<sup>-1</sup> driven by exchange-coupling torque in synthetic antiferromagnets, *Nature Nanotech* Vol. 10, pp. 221-226 (2015)

## 超伝導デバイス開発研究

Investigation on superconducting devices

島影 尚

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育・研究センター

H. Shimakage

Green Device Education and Research Center, Ibaraki University

### 1.概要

高温超伝導体である  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (BSCCO) を高周波デバイスへ応用するために、BSCCO の高品質薄膜化へ向けた作製プロセスを実験的に調べた結果を述べる。本研究では、低コストで大面積に成膜が可能な有機金属分解法により BSCCO の薄膜化を行った。特に、研究の最終目標としては高周波応用を視野に入れているため、低損失であるサファイア基板上への薄膜成膜を試みた。その研究過程で、サファイア基板と BSCCO 薄膜との格子不整合性や、材料同士の高い反応性の問題点が明らかとなった。これらを解決するために、薄膜と基板との間に  $\text{CeO}_2$  バッファ層の導入を検討した。 $\text{CeO}_2$  バッファ層はレーザーアブレーション法によって成膜した。バッファ層を導入した結果、BSCCO の結晶性の向上が見られたが、同時に  $\text{CeO}_2$  バッファ層の成膜条件の精査が必要であることもわかった。そこで、成膜時の基板温度、酸素圧などの成膜条件を精査した。その結果、(111)面の強度ピークを抑制した単結晶的な  $\text{CeO}_2$  バッファ層の成膜には高い基板温度と低い酸素圧が必要であることがわかった。基板温度 820℃、酸素圧 200mTorr で成膜した  $\text{CeO}_2$  バッファ層は(200)面配向を示し、良好な結晶性を持つことがわかった。また、 $\text{CeO}_2$  バッファ層を導入した BSCCO 薄膜は c 軸配向を示し、BSCCO の超伝導特性も大幅に向上していることも確認できた。これに加えて、臨界温度のバッファ層膜厚依存性が見られ、バッファ層の膜厚 40 nm で臨界温度が 83 K を達成した。

### 2.はじめに

ジョセフソン効果デバイスを始めとする超伝導デバイスは、高感度な磁場検出器や電磁波検出器の検出部に使用されており、それぞれは、医療現場における脳磁場計測や、電波天文学における電磁波観測で活躍している。それらの応用で使われている超伝導材料は Nb 系超伝導材料(臨界温度:9K)であり、すでに 20 年以上の実績を有している。また、超伝導体デバイスは高感度性だけでなく、低消費電力の特徴を持ち、グリーン

デバイスの一つとしての側面も持っている。しかし、Nb 系超伝導材料を用いたジョセフソン接合では、動作温度が液体ヘリウム温度(4.2K)と低く、汎用的使用ができない。そこで、我々の研究グループでは、動作温度が液体窒素温度(77K)以上の高温超伝導体を用いたデバイスの開発研究を行っている。研究内容としては、1) BSCCO 高温超伝導薄膜の研究、2) BSCCO 高温超伝導体ジョセフソン素子の作製研究、3) YBCO 高温超伝導体ジョセフソン素子の作製研究、4) BSCCO ジョセフソン素子からのテラヘルツ放射に関する研究、5) YBCO ジョセフ接合からのカオス発生に関する研究、6) YBCO 薄膜を用いたパラメトリック増幅器の研究、などを行っている。本年度の研究報告では、BSCCO 高温超伝導薄膜の作製研究を取り上げ、その進捗状況について報告する。

### 3.BSCCO 超伝導薄膜に関する研究

#### 3.1 背景

本研究で使用する高温超伝導体は BSCCO であるが、そのデバイス化研究は、様々な機関で行われてきている。現在研究されているデバイス化の主流は、バルクを用いた研究である。しかし、将来的なデバイス応用に向けては、集積化が必要不可欠であるが、バルクではその対応が困難となる。そこで、我々は BSCCO の薄膜化を目指して研究を行っている。一般的な BSCCO 薄膜の成膜法として、スパッタリング法[1]や MOCVD 法[2]などが報告されており、比較的高い臨界温度の薄膜が得られている。しかし、これらの成膜法は、真空装置が必要であることなどから、コストが掛かることが欠点であった。我々は、低コストで大面積に薄膜が成膜可能な方法として、有機金属分解法(MOD 法)を用いて成膜研究を行った。

#### 3.2 有機金属分解法(MOD 法)

この節では、BSCCO 薄膜の成膜方法として用いた有機金属分解法について述べる。有機金属溶液は高純度化学研究所の SK-BSCCO-008 SYMETRIX を原液

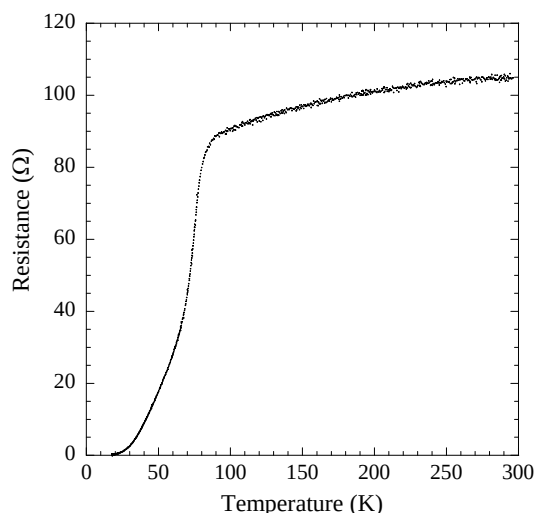


図 1 サファイア基板上に成膜した BSCCO 薄膜の抵抗温度特性

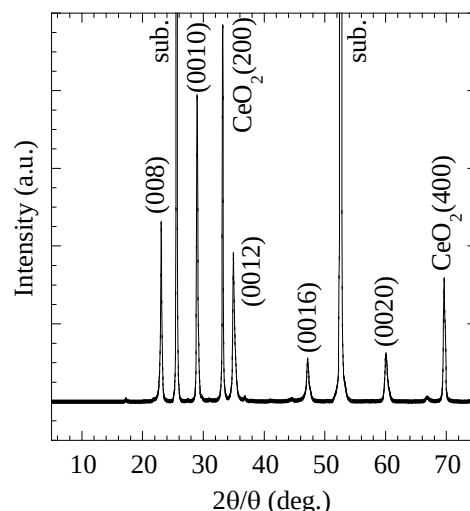


図 3 BSCCO 薄膜/CeO<sub>2</sub>/サファイア基板の XRD 測定結果

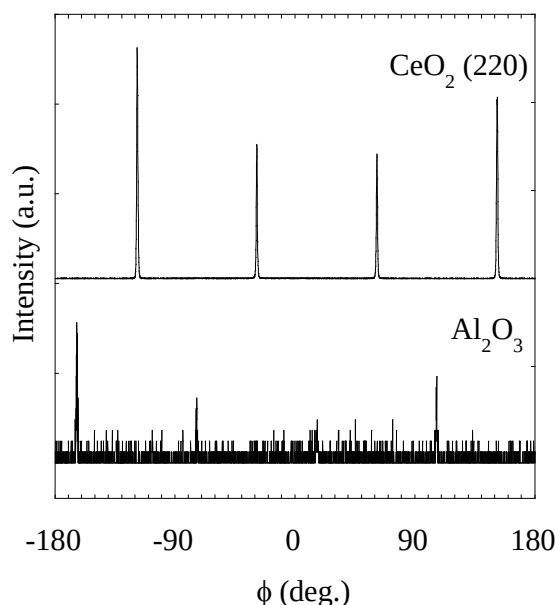


図 2 CeO<sub>2</sub> 薄膜の φ スキャン測定結果

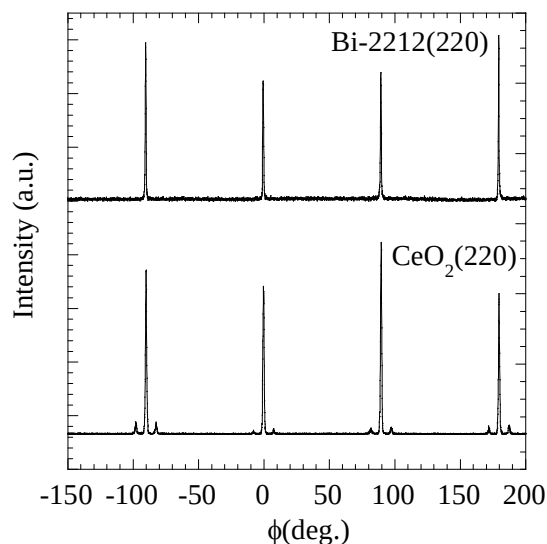


図 4 Bi-2212 の φ スキャン測定結果

で使用した。製膜方法は以下である。

- 基板上に有機金属分解溶液を数滴滴下する。
- スピナーで 1000 rpm 20 sec → 3000 rpm 40 sec と溶液を塗布する。
- 有機溶剤を除去するためホットプレートにより 120℃ で 2 分間乾燥する。
- 有機物を分解、揮発させるため電気炉で仮焼成を 500℃ で 15 分間行う。
- (a)～(d)の工程を 3 回行う。
- 酸化、緻密化、結晶化のために電気炉により 840℃ で 30 分間本焼成を行う。

サファイア基板上に BSCCO を直接成膜した薄膜の臨界温度測定の結果を図 1 に示す。臨界温度が 25K

程度の薄膜が得られた。これは、バルクに比べて低く、その理由として、サファイ基板と BSCCO が反応していることが大きな理由と予想された。そこで、それを解決するために、バッファ層の導入を検討した。導入するバッファ層としては、CeO<sub>2</sub> を選択した。CeO<sub>2</sub> をレーザーアブレーション法により成膜を行い、XRD 測定により、CeO<sub>2</sub> 薄膜の結晶性がより向上するように、製膜条件の最適化を行った。サファイア基板は、CeO<sub>2</sub> が立方晶であることを考慮し、基板表面が矩形型の結晶構造を持つ、R 面サファイアを使用した。CeO<sub>2</sub> 薄膜の最適な成膜温度は 780℃ であった。XRD の測定結果より結晶性の良い CeO<sub>2</sub> 薄膜が作製されたことが確認された。最適化後に測定した CeO<sub>2</sub> 薄膜の φ スキャン結果を図 2 に示す。測定においてはサファイ基板の (0001) 面と、CeO<sub>2</sub> 薄膜

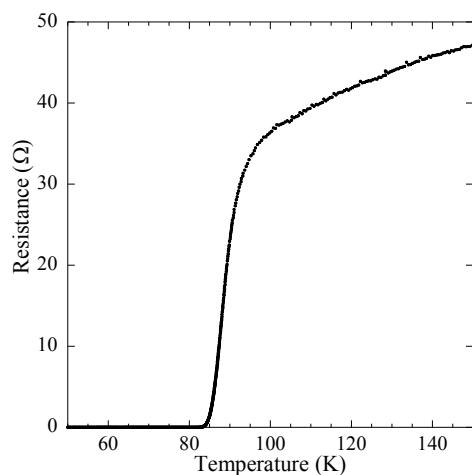


図5 最適化された Bi-2212 薄膜の抵抗温度特性

の(220)面を使用した。CeO<sub>2</sub> 薄膜が基板と 45° 傾いて成長していることが観測された。また、 $\phi$  スキャンのピークが観測されたことから、結晶の面内配向性が非常に高い膜が得られていることが示唆されている。

次に、作製された CeO<sub>2</sub> 薄膜上に MOD 法により BSCCO 薄膜を成膜した。図3にその薄膜の XRD 測定結果を示す。CeO<sub>2</sub> の結晶性の良さが反映され、BSCCO の結晶性も高いものが得られた。さらに Bi-2212 薄膜の面内配向性を調べるために  $\phi$  スキャン測定を行った結果を図4に載せる。Bi-2212 の 90° 間隔の 4 回対称のピークと CeO<sub>2</sub> の 90° 間隔の 4 回対称のピークが同じ方向に成長していることが観察された。

CeO<sub>2</sub> 薄膜上に成膜する BSCCO についても、高い臨界温度が得られるように、最適化を行った。その結果得られた薄膜の臨界温度特性を図5に示す。臨界温度が約 83K であり、バルクに近い臨界温度が得ることができた。これは、真空プロセスを使わない簡便なプロセスで、高品質の薄膜が得られることを示した結果であり、デバイス応用の観点からも、非常に重要な結果と考えている。

## 5. 結論

真空を用いない簡便な製膜方法である MOD 法を用いて、高品質の BSCCO 薄膜の製膜条件の精査を行い、作製した薄膜の臨界温度が約 83K を得た。BSCCO は、単一格子の中に、ジョセフソン接合を内在する性質を持っている。その性質を取り出すためには、結晶性の良い薄膜を作製し、パターニングなどのプロセスを行わなければならない。その性質が取り出せたなら、ジョセフソン接合の集積化を行うことができる。BSCCO のジョセ

フソン接合からのテラヘルツ放射は、すでに報告されている[3]が、現状はバルクを使って作製したものの報告がほとんどである。本研究の次のステップは、得られた薄膜から、ジョセフソン接合の特性を得られるかを調べることである。それが可能となれば、集積化などへの指針を与えることができ、エレクトロニクス応用へ大きな一歩になることは間違いない。また、比較的高温で動作する超伝導デバイスが作製できれば、グリーンデバイスとしての非常に価値の高いものになると思われる。

## 【参考文献】

- [1] M. Ogura, K. Matsumoto, K. Katsurahara, S. Kishida, H. Yoshikawa, S. Fukushima, “Preparation of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>n-1</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>y</sub> superconducting films by a rf magnetron sputtering method with multi-targets,” *Physica C*, vol. 392–396, Part 2, pp. 1306–1309, 2003.
- [2] K Endo, H Sato, K Yamamoto, T Mizukoshi, T Yoshizawa, K Abe, P Badica, J Itoh, K Kajimura, H Akoh, “Fabrication of intrinsic Josephson junctions on BSCCO superconducting films grown by MOCVD,” *Physica C*, vol. 372–376, Part 2, pp. 1075–1077, 2002.
- [3] K. Yamaki, M. Tsujimoto, T. Yamamoto, A. Furukawa, T. Kashiwagi, H. Minami, and K. Kadowaki, “High-power terahertz electromagnetic wave emission from high-T<sub>c</sub> superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> mesa structures,” *Optics Express*, 19, pp. 3193–3201, 2011.

## 高性能熱電変換材料の開発

Development of thermoelectric materials with high performance

池田輝之

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

Teruyuki Ikeda

Green Device Education and Research Center, Ibaraki University

### 1.はじめに

世界で生産されるエネルギーの 60% 以上が、ほぼ「廃熱」として捨てられている。熱の有効利用は今日のエネルギー問題の重要な鍵の一つである。熱電材料は廃熱から電気エネルギーを生産できる優れた機能を持ち、今後益々重要性を増す。エネルギー問題の解決の一助となるように熱電材料を発電デバイスとして広く普及させるためには、有害元素を含まず安価な熱電材料の開発と性能の向上という二つの課題を克服する必要がある。

本研究では、さまざまな材料プロセスを応用し、熱電材料にナノ構造を導入し、超高密度相界面を形成させる。このことによりもたらされる複数の新しい機能を利用し、熱電特性を著しく向上させた実用熱電材料を開発する。

本年度は、いずれも環境低負荷性を有し優れた熱電特性の優れた材料（シリコン、マグネシウムシリサイド ( $\text{Mg}_2\text{Si}$ )、 $\text{SnSe}$ ) を選び、それぞれにナノ構造を導入するための研究を行った。

### 2. Si のナノ構造化

Si を熱電材料として使用できるようにするため、熱伝導率の低下及びドーパント固溶度の増大をともに達成することを目的に、ドーパント元素のナノ粒子を Si 中に分散させるための研究を行った。

ドーパント元素として、Sb を選定した。ナノ粒子を得るためには、Sb を Si 中に強制固溶させるとよい。そのため、メカニカルアロイングにより Sb を Si 中に強制固溶させる実験を行った。

図 1 にボールミル法によるメカニカルアロイング後の粉末 X 線回折図形を示す。ボールミル 15 min では、Sb のピークが確認できるが、16 h ボールミルを行った後には、Sb のピークが確認できない。このことは、16 h のボールミルにより Sb が Si に固溶したことを示唆している。室温での Sb の平衡固溶度は 1% 以下であるため、上記の状態は、Si 中に Sb が非平衡に強制固溶した状態であるといえる。

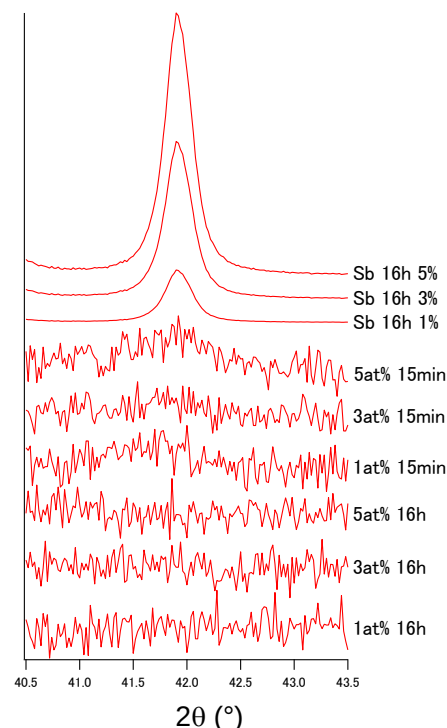


図 1 Si-1, 3, 5%Sb のボールミル後の XRD プロファイル。ボールミルの時間を図の右側に示している。上端の三つのプロファイルは Sb 単体のプロファイルであり、Si 中の Sb のピークの高さと比較できるように、体積分率を考慮して高さを縮小して示している。

### 3. PbSe-SnSe の合成

最近、 $\text{SnSe}$  が非常に優れた熱電特性を示すことが報告された。熱電性能指数  $zT$  の値は 2.6 であり、これまでバルク熱電材料で報告されている値としては最高である。

本研究は、 $\text{PbSe}$  との合金化によりこの値をさらに高めることを目的とする。この合金化によって、合金効果およびナノ構造化の効果により熱伝導率が低下し、熱電性能指数が高まると期待できる。セレン化物については、我々は合成法のノウハウを持たないため、本年度はこれらの合金の合成法を確立した。

合成は、石英管に原料となる元素を封入し、気相 (Se) -液相 (Sn または Pb) 間の反応を利用して行った。組成は、 $\text{SnSe}$ 、 $\text{PbSe}$  及びこれらの間の合金組成である。

その結果, SnSe 及び PbSe については, 原料の Pb (または Sn) と Se を石英管に封入し熱処理するだけで, 純度の高い化合物が得られることが分かった. その際, 注意すべきことは Se の蒸気圧が石英管の耐圧に十分耐えられるように約 3 atm. を越えないこと, 及び, 合成は高温においてより速く進行するため, できるだけ高温が望ましいことの二つである. これらを同時に満たすため, 温度勾配をつけることにより, Se の蒸気圧を 3 atm. 以下に保持する低温部と, 合成が進行する高温部を一つの石英管に持たせながら合成するのが効率的であることを見出した.

化学組成的に, SnSe と PbSe の間に位置する  $\text{Pb}_{0.1}\text{Sn}_{0.4}\text{Se}_{0.5}$  及び  $\text{Pb}_{0.4}\text{Sn}_{0.1}\text{Se}_{0.5}$  については前述の単純化合物の作製法では純粋な化合物が得られないが, 合成反応後, 均質化焼鈍を加えることにより純粋な化合物が得られることが明らかになった. 例として, 図 2 に  $\text{Pb}_{0.1}\text{Sn}_{0.4}\text{Se}_{0.5}$  の均質化焼鈍後の粉末 X 線回折プロフィールを示す.

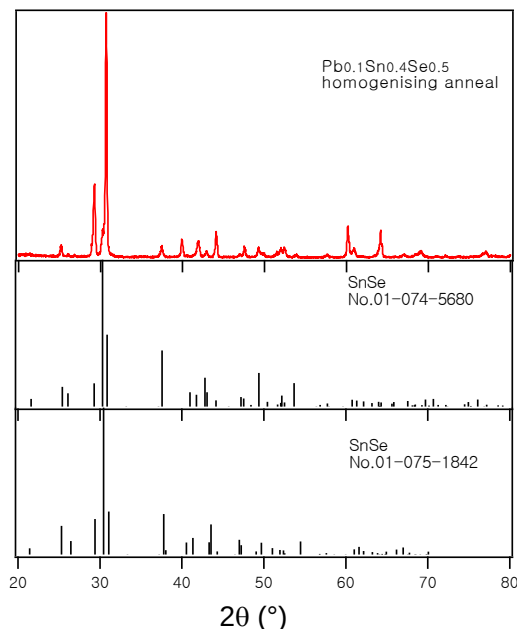


図 2  $\text{Pb}_{0.1}\text{Sn}_{0.4}\text{Se}_{0.5}$  の均質化焼鈍後の X 線回折プロフィール. 純度の高い SnSe 相試料が合成されている.

### 3. $\text{Mg}_2\text{Si}$ のナノ構造化

$\text{Mg}_2\text{Si}$  は, 環境低負荷であり, 地球上に豊富に存在する元素により構成され, かつ, 優れた熱電特性を有することから, 実用化の期待の大きい熱電材料である. 我々は, この  $\text{Mg}_2\text{Si}$  の熱電特性をさらに向上させるべく, ナノ構造化に取り組んでいる. 昨年度までに,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  に Si を添加し, 高エネルギーボールミリングを施すことにより,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  中に Si を強制固溶させることが可能であることを見出した. この状態は, 非平衡状態であるため, 一旦, この状態を実現できれば, 大きな Si 析出の駆動力が働き, ナノ複合体が形成される (図 3).

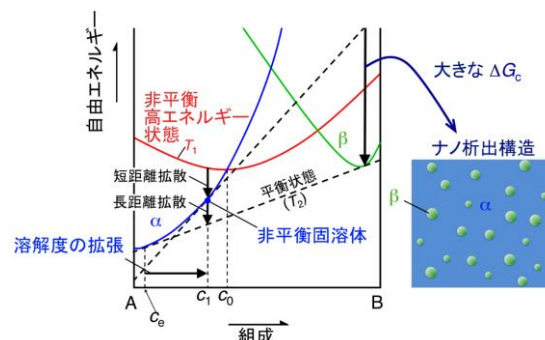


図 3 A-B 二元系の自由エネルギー模式図. “energized state” は MA 後の非平衡状態である.  $\alpha$  相の自由エネルギー曲線の勾配が大きければ (ラインコンパウンド等), 過飽和固溶体を得るため高いエネルギーが必要である一方, 平衡状態へ遷移する駆動力が大きいため, 細かい構造が得られる.

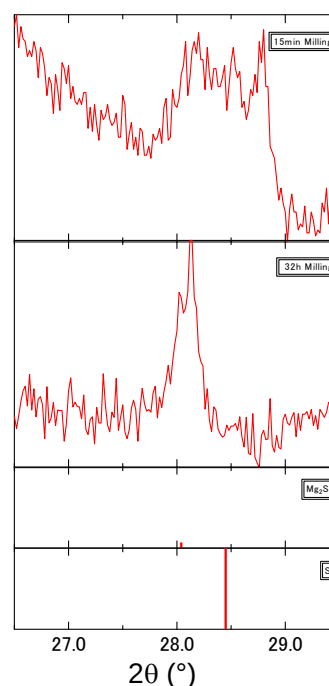


図 4  $\text{Mg}_2\text{Si}$  + Si 試料の 15 分 (上) 及び 32 時間ボールミリング後 (下) の X 線回折プロフィール. 32 時間ボールミリング後では Si のピークが消失している.

このプロセスにおいて, 難点は,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  は酸素との反応性が高いため, ボールミリングの微粉化過程で, 著しく酸化が進んでしまうことである. そこで, 本年度は, この解決に向けた実験を行った.

ボールミル装置を装置ごとアルゴンガスで満たされるグローブボックスに入れ, グローブボックス内で運転可能にした. その結果, 酸化反応が著しく抑制されることが分かった. また, この状態で, Si が  $\text{Mg}_2\text{Si}$  相に固溶したことを示唆する XRD プロファイルが得られた (図 4).

### 4. 結論

高エネルギーボールミリングにより Si 及び  $\text{Mg}_2\text{Si}$  のナノ構造化に必要な強制固溶状態を作り出すことができた. また, 高純度の SnSe の合成に成功した.



## ハイスループットな手法のための熱電材料の局所熱物性計測

Thermophysical Properties of materials

太田弘道

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

Hiromichi Ohta

Green Device Education and Research Center, Ibaraki University

### 1. 概要

環境負荷の少ない電子デバイス製造プロセスの開発にはプロセスの最適化、省エネルギー化のため様々な材料の熱物性値が必要となる。例えば熔融状態を経て製造されるデバイスでは融体の物性が、複数の物質が組み合わさって製品となる場合は複数の相からなる材料の見かけの熱物性値や熱抵抗などの相間の熱物性値が要求される。我々は熱物性計測と、得られた熱物性値と構造の関係についての研究を進めてきた。

本稿ではグリーンデバイス教育研究センターの活動にとって重要な熱電材料のハイスループットと呼ばれる開発法に必須な材料の微少領域の熱伝導率を熱物性顕微鏡と呼ばれる装置により測定する技術の開発について報告する。

### 2. はじめに

熱電材料は廃熱から電気エネルギーを生産することができる材料として注目を集めている。熱をエネルギーに変換する効率は無次元熱電性能指数  $ZT$  が大きいほど大きくなる。 $ZT$  は  $ZT = S\sigma T / \kappa$  ( $T$ : 絶対温度  $S$ : ゼーベック係数,  $\sigma$ : 電気伝導率,  $\kappa$ : 熱伝導率) で表される。熱伝導率  $\kappa$  の値を低くすることにより高  $ZT$  材料を実現するための研究が進められている。様々な作成条件や組成で試料を作成し、最適条件を探索することが必要であるが、最近「ハイスループット」と呼ばれる方法が開発された[1]。この方法はバルク材料中に作製条件の分布を形成し、物性値を走査的に測定し一挙に最適条件を探す方法である。例えば材料中に組成分布を形成し、各部分の組成と物性を計測することにより、最適な組成を探す手法である。この手法には 2 つの要素が必要である。

- 1) 必要な組成分布を持った試料を効率的に作成する手法の確立。
- 2) 局所の物性を迅速に測定しマッピングする手法。

本研究では局所の熱物性値を測定するため、産総研、株式会社ベテル、茨城大学の共同開発により作製した熱物性顕微鏡により局所的な熱伝導率を求めマッピングするため、解析法の改良を行った。

### 3. 熱物性顕微鏡の原理

微小部分の伝熱的測定は一般に困難である。熱拡散率  $\alpha$ 、長さ  $d$  の材料の一端を加熱すると、試料は加熱後、特性時間  $\tau = d^2 / \alpha$  程度でほぼ等温に達する。熱拡散率が  $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  の銅を考えると、長さ 500nm 程度の部分の伝熱的特定を測定しようとする特性時間は  $2 \times 10^{-9} \text{s}$  程度になる。したがって高速の時間応答性を持つ検出器が必要となる。一般に温度測定に使われる InSb や HgCdTe などの赤外線検出器の時間応答性は  $10^{-6} \text{s}$  程度であり、このような短時間の温度変化を測定することは不可能である。このため微小部の伝熱物性の測定には標準的な温度測定法が使えない。従来、研究者は高価なレーザやアンプを組み合わせたシステムを自作しサーモフレクタンス法を用いて薄膜や微小部分の測定を行ってきた[2]。サーモフレクタンス法の技術を元に我々は安価な半導体レーザ、単純な光学系、ノイズ低減のための信号増幅技術を用いて容易に微小部の伝熱特性の測定ができる熱物性顕微鏡を開発してきた[3]。

サーモフレクタンス法は非接触・非破壊で表面温度変化を高い時間分解能で測定する手法である。この方法ではパルス光や強度を周期的に変えたレーザビームを試料表面に照射して加熱し温度変化を測定する。金属や半導体表面の光の反射率は 10K 以下の温度変化に対しては線形に変化するので、試料表面の温度変化を反射率変化から検出することができる。反射率  $R$  と表面温度  $T$  は次のような関係となる。

$$\frac{dR}{dT} = C(\lambda) \frac{R_0}{T_0} \quad (1)$$

この式の、 $R_0$  は温度  $T_0$  における反射率である。係数  $C(\lambda)$  は入射する光の波長  $\lambda$  に依存する物質固有の値である。

熱物性顕微鏡では一定強度のレーザ光(プローブレザ)を試料表面に照射し、その反射光の強度を測定する。反射光の強度変化  $\Delta S$  から次の式で薄膜表面の

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{\Delta R}{R_0} = C(\lambda)\Delta T \quad (2)$$

ここで  $S_0$  は反射光の強度である。 $\Delta S$  は  $S_0$  に対してごく小さい。この変化を測定するために、差動受光フォトディテクタやロックインアンプを用いて信号検出を行う。熱物性顕微鏡の測定原理を図 1 に示す。試料の表面に金属薄膜を形成する。この薄膜は温度検出および加

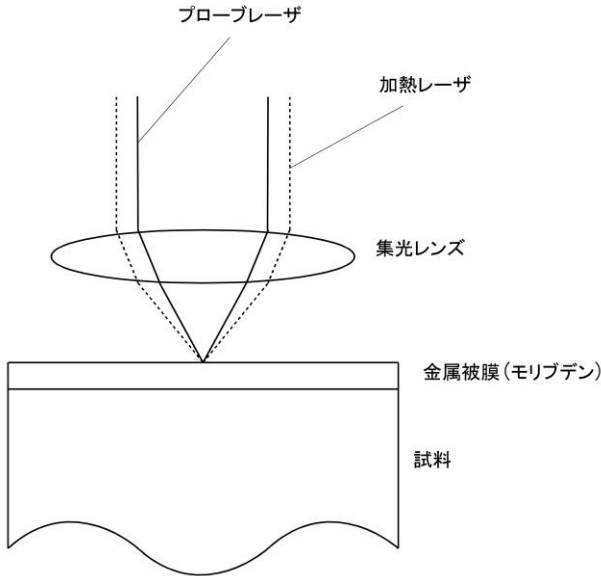


Fig.1 熱物性顕微鏡の原理

熱用レーザの吸収体として用いられる。表面の膜を強度変調したレーザで周期加熱する。同時にプローブレザにより温度変化を測定する。加熱レーザビームの強度変化と試料表面の温度変化には位相の遅れが生ずる。この位相の遅れは試料の熱的な性質と加熱周波数に依存する。試料表面を角周波数  $\omega$  の正弦波で加熱した場合の表面温度変化の交流成分は定常状態では加熱波と同一の角周波数  $\omega$  の正弦波となり、位相の遅れ  $\delta$  は次式で表される。

$$\delta = \frac{3}{4}\pi + \arctan \left( \frac{\cosh^2 \sqrt{\frac{\omega\tau_f}{2}} \left( \tanh \sqrt{\frac{\omega\tau_f}{2}} + \beta \right) \left( \tanh \sqrt{\frac{\omega\tau_f}{2}} + \beta^{-1} \right)}{\cos^2 \sqrt{\frac{\omega\tau_f}{2}} (\beta - \beta^{-1}) \tan \sqrt{\frac{\omega\tau_f}{2}}} \right) \quad (3)$$

$$\tau_f = d^2 / \alpha_f = d^2 / \rho_f C_f \quad \lambda_f = d^2 \rho_f^2 C_f^2 / b_f^2 \quad (4)$$

$$\beta = \frac{b_s}{b_f} = \frac{\sqrt{\lambda_s \rho_s C_s}}{\sqrt{\lambda_f \rho_f C_f}} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_f$  は薄膜の特性時間、 $d$  は薄膜の厚さ、 $b$  は熱浸透率、 $\lambda$  は熱伝導率、 $\rho$  は密度、 $C$  は比熱、添え字

の  $f$  および  $s$  はそれぞれ金属薄膜および試料を表す。位相遅れ  $\delta$  から試料の熱浸透率  $b_s$  を式(4)および(5)により求めることができる。試料の熱伝導率  $\lambda_s$ 、熱拡散率  $\alpha_s$  は次の式から求める。

$$b_s = \sqrt{\alpha_s \rho_s C_s} = \sqrt{\lambda_s \rho_s C_s} \quad (6)$$

装置の全体図を図 2 に示す。金属薄膜として 100nm の

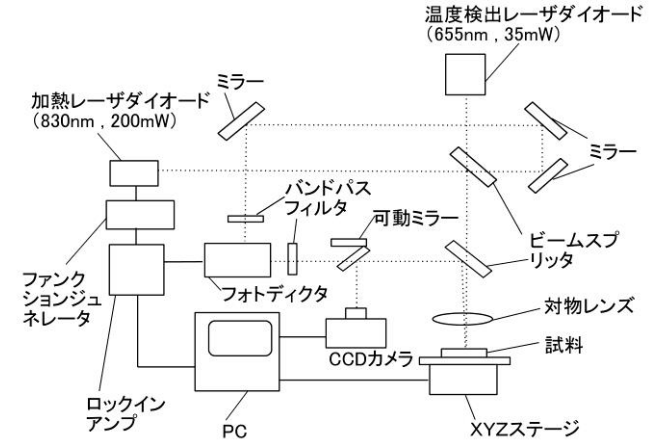


Fig.2 熱物性顕微鏡

厚さにスパッタしたモリブデンを用いる。光学系は金属の組織観察によく使われる垂直落射反射顕微鏡と同様の構成となっている。金属顕微鏡とも呼ばれるこの顕微鏡では試料表面を照明しその反射光を見る。熱物性顕微鏡ではこの顕微鏡の光検出部にフォトディテクタを置き、照明用光源の代わりに加熱用レーザとプローブレザの2つの光を同軸で試料の同一箇所に集光する。加熱レーザは波長 830nm、出力 200mW、スポットは楕円形で長径  $26\mu\text{m}$ 、短径  $7\mu\text{m}$ 、DC から 7MHz の間で強度変調できる。プローブレザは波長 655nm、スポットは円形で直径  $7\mu\text{m}$ 、出力 30mW である。測定領域の光学顕微鏡像を得るために照明用の発光ダイオードと CCD カメラが設置されている。試料を計算機制御した移動ステージにより動かすことによりレーザの照射位置を走査し熱浸透率の分布像(顕微鏡像)を得ることができる。

プローブ光の強度変化を正確に測定するため、差動受光フォトディテクタによる温度検出が使われる。試料表面で反射したプローブレザの強度変化には測定しようとする試料の温度変化に相当するものとプローブレザ自体の強度の揺らぎが重なっている。そこで、プローブレザ自体の強度の揺らぎを、測定される信号から差動受光フォトディテクタで差し引くことにより温度変化に相当する成分を取り出す。具体的には試料表面に入射する前のプローブ光をビームスプリッタで分岐し、その一部を差動受光フォトディテクタに導く。また、試料表面で反射した後のプローブレザもこのディテクタに



導き、2つの信号の強度の差を検出することにより温度変化に対応する信号のみを抽出する。この信号をロックインアンプに導き、加熱光との位相差 $\delta$ を測定し熱浸透率を求める。

銅(Cu)中にニオブチタン(NbTi)の直径 $117\mu\text{m}$ の超伝導フィラメントを埋め込んだ超伝導線材料の測定結果[3]を図3に示す。この材料のフィラメントに平行な方

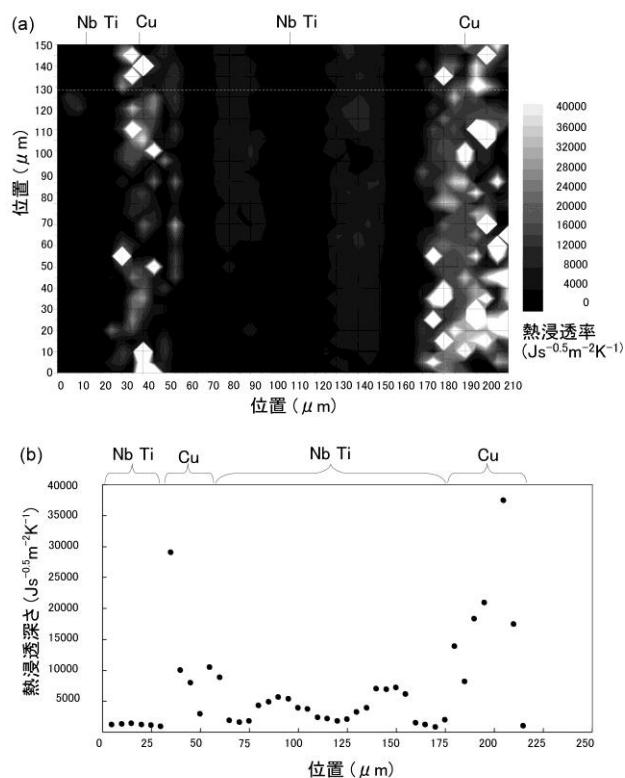


Fig.3 (a)銅にニオブチタンの直径 $117\mu$ の超伝導フィラメントを埋め込んだ超伝導線材料の測定結果  
(b)上の図の白い破線の部分の熱浸透率分布

向の面を研磨すると母材とフィラメントが帯状に交互に現われる。図3はこの面を観察したもので熱浸透率の高い銅の部分と低いニオブチタンの部分のコントラストがあらわれている。

図4にはハイスループットな手法と熱物性顕微鏡を結びつける試みの結果を示している。直径 $50\text{mm}$ の円板状のサファイア基板上にハロゲン化気相エピタキシー法(HVPE)により作製した厚さ $440\mu\text{m}$ の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 試料の熱浸透率の測定結果を示す[4]。この試料は基板上の位置により $x(\text{Al}/\text{Ga比})$ の値が連続的に変化している。この基板の上下左右中央の5ヶ所で熱物性顕微鏡により熱浸透率を測定した。図4(a)に測定を行った部分の $x$ の値と熱浸透率の関係を示す。熱浸透率と $\text{Al}/\text{Ga}$ 比の間には高い相関が見られることが分かる。また、従来の研究者による測定値との比較を図4(b)に示した。今回測定したものと同一の組成はないが、従来の測定値とも矛盾しない傾向を示していることがわかる。厚さ $440\mu\text{m}$ の物質の基板上につけたままの状態での局所

熱物性の測定は従来の測定手法では困難でありハイスループットな手法における熱物性顕微鏡の有効性が分かる。

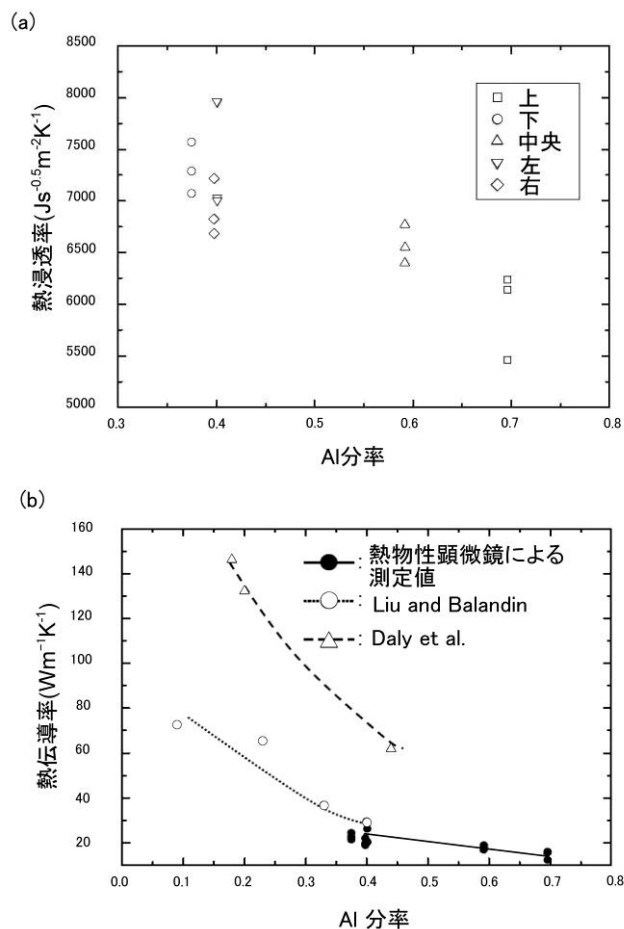


Fig.4 ハロゲン化気相エピタキシー法によりサファイア基板上に成膜した $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の熱浸透率  
(a)測定位置による値の差(b)従来の測定値との比較  
○:W. Liu and A.A.Balandin:J.Appl.Phys. 97(2005), 073710. △:B.C.Daly, H.J.Mariss, A.V.Numikko, M. Kuball and J.Han:J.Appl.Phys.92(2002) 3820

#### 4.新しい解析法

この手法は局所熱物性の効率的な測定法として開発され順調に使用実績を積み重ねてきたが高熱伝導率材料に対する精度が十分に確保できていなかった。たとえば金属系材料ではステンレスのようにかなり熱伝導率の低い材料に対しても信頼性のある値が得られていない。今年度はこれらの点を克服する手法についての2つの論文を作成し、現在投稿中[5, 6]である。ここでは概要のみを紹介する。従来、熱物性顕微鏡で熱伝導率の高い材料の熱伝導率が正確に測定できなかった理由は解析の前提として試料表面から試料内部方向に向かう一次元熱流のみを考えていたためである。レーザを照射したスポットから径方向への熱流を考えた解析

を行えば、熱伝導率の高い材料に対しても正確な測定を行う事ができる。このため径方向伝熱も考慮した熱移動方程式を解いて、得られた解と測定値を比較することにより熱伝導率を求める手法を開発した。この手法では、試料の比熱と密度の値が必要となるが、原理的にはすべての試料の測定が可能となる。実際に測定してみると銅や金などのように非常に熱伝導率の高いものは温度振動の振幅が小さくなってデータがノイズに埋もれてしまうが、それ以外のものではまったく問題なく測定できることが分かった。

また、表面にスパッタするモリブデンの熱伝導率を下げることで、試料の比熱容量や密度の影響を受けにくい測定ができることも明らかとなった。モリブデンの熱伝導率は  $140\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  程度であるがスパッタ膜の熱伝導率は酸素分圧やアルゴン分圧を上げると  $5\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$  程度まで下げることができる。この膜は高真空下で生成した膜と比較するとわずかに黒みをおびているだけで見かけはほとんど変わらないが、X 線で測定するとかなり密度が低く多数の欠陥を内包していることが分かる。このような膜を用いることで、試料の密度と比熱の値に依存しない測定が出来ることが分かった。

## 5. 結論

ハイスループットな手法による熱電材料の開発に必須となる広い範囲の局所的な熱伝導率の測定が可能となる手法の開発を行った。まだ純銅や純金のように熱伝導率の著しく高い材料の測定はできないが、熱伝導材料は熱伝導率が高くなると効率が低下するため、高い熱伝導率の物質が熱電材料に使われることはない。今年度の研究により、ハイスループットな手法による熱伝導材料の開発に必要な熱伝導率の領域をカバーできるようになった。

## 6. おわりに

新しい解析法を用いることにより、広範な範囲での局所熱物性値の計測が可能となった。今後、実際の熱電材料の熱伝導率を計測する。

## 【参考文献】

- 1) ハイスループットな手法についての解説としては例えば池田輝之, 太田弘道: バルク熱電材料への「ハイスループット(high-throughput)」なアプローチ, 金属, **83**, 159/166, (2013)
- 2) 多くの研究が行われているが例えば柴田浩幸, 太田弘道, 宮下正巳, 野口敬員, 佐藤俊一: フェムト秒パルスレーザ熱反射法による金属薄膜の熱拡散率測定, 早稲田嘉夫: 素材工学研究彙報, **58**, 7/18, (2003)
- 3) K.Hatori, N.Taketoshi, T.Baba, H.Ohta: Thermoreflectance Technique to Measure Thermal

Effusivity Distribution with High Spatial Resolution, Rev. Sci. Instrum., **76**, 114901-1/114901-7, (2005)

- 4) H.Shibata, H.Ohta, T.Nemoto, S.Nagayama, Y.Waseda, K.Fujii, K.T.Jacob: Measurement for Thermal Effusivity of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  Alloys Using Thermoreflectance with Periodic Heating, **29**, 515/522 (2011)
- 5) H.Ohta, G.Matsui, T.Yagi, S.Miyake, T.Okamura, R.Endoh, R.Okada, K.Morishita, S.Yokoyama, K.Taguchi, H.Kato: Analysis of Three-Dimensional Heat Flow by Modulated Spot Heating Using a Phase Lag Matrix with a Combination of Thermal Effusivity and Volumetric Heat Capacity, JJAP, 投稿中
- 6) G.Matsui, H.Ohta, S.Miyake, H.Kimihito, K.Taguchi, Y.Suguru: Wide-range measurement of thermal effusivity using molybdenum thin film with low thermal conductivity for thermal microscope, Int. J. Thermophys., 投稿中

## 計算機支援によるグリーンマテリアル設計

Design of green materials with the aid of computer simulations

篠嶋 妥

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

Yasushi Sasajima

Green Device Education and Research Center, Ibaraki University

### 1. はじめに

材料設計は今やナノオーダーで組織制御を行う段階に達している。計算機実験は、望ましい組織を得るための実験条件をあらかじめ絞り込むことができ、グリーンマテリアルの設計開発への大きな貢献が期待できる。本研究では、熱電材料開発のために、Cu を添加した Si/Ge アモルファス多層膜、および  $Mg_2Si$  合金に関する計算機シミュレーションを行った。

### 2. Cuを添加したSi/Geアモルファス多層膜の原子構造と熱伝導率の計算機シミュレーション

有望な熱電材料である、Cu を添加したアモルファス Si/アモルファス Ge 多層膜の熱処理に伴う構造変化を分子動力学法により計算した。熱伝導率を久保の公式により算出して、ミクロな構造と熱伝導率との相関を調べた。試料は以下の 4 種類、(a) Si/Ge、(b) Si/(Ge+Cu)、(c) (Si+Cu)/(Ge+Cu)、(d) Cu/Si/Cu/Ge Cu である。ただし、X+Cu は X 層に Cu を添加すること、/Cu/ は Cu 原子層を挿入することを表している。熱処理前後の熱伝導率の計算結果を Tbl.1 に示す。Cu を多層膜全体に添加した試料(c)では熱伝導率に変化がなかった一方で、Cu を Ge 層にのみ添加した場合(b)、および Cu を極薄膜として Si-Ge 界面に挿入した場合(d)では、熱伝導率が低下した。

Tbl.1 Thermal Conductivity of every specimens in amorphous condition and after heat treatment condition.

| Specimens          | Thermal Conductivity (W/(mK)) |                      |
|--------------------|-------------------------------|----------------------|
|                    | Amorphous                     | After Heat Treatment |
| a) Si/Ge           | 2.83                          | 2.28                 |
| b) Si/(Ge+Cu)      | 2.98                          | 1.08                 |
| c) (Si+Cu)/(Ge+Cu) | 2.41                          | 1.94                 |
| d) Cu/Si/Cu/Ge     | 6.07                          | 3.19                 |

熱処理後の4配位と取る原子を抜き出したところ、Fig.1 ようになった。これは、Cu が存在しない部位でクラスターの析出が促進され、Cu が存在する部位ではアモルファス構造が安定化するために、結晶度の異なる部位が変調した構造になり、フォノン散乱が促進されることが原因として考えられる。本計算により、Cu 添加法と熱処理法を工夫することによって熱電性能のさらなる向上が見込めることが示された。

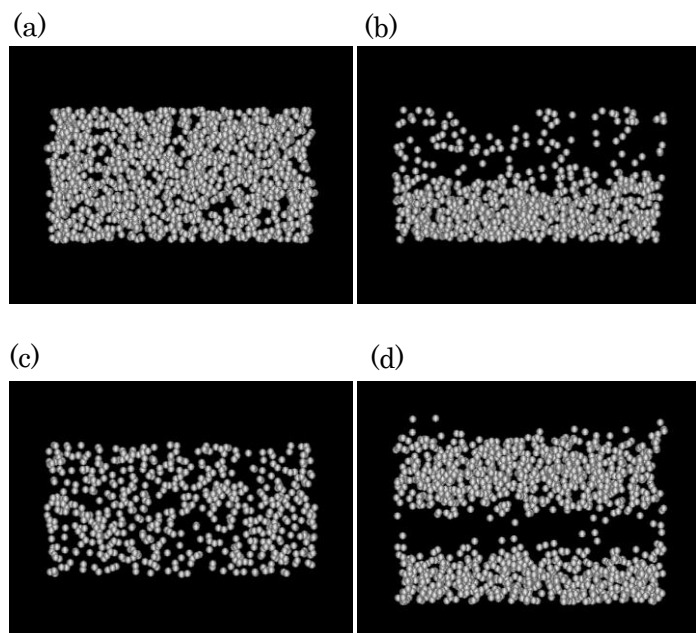


Fig.1 4 coordinated atoms after heat treatment

### 3. $Mg_2Si$ 合金の析出過程の Phase-Field シミュレーション

高エネルギー非平衡状態を利用する新しいプロセスにより、安価で低環境負荷型のシリコン及びシリサイド熱電材料に「シングルナノ」メートルの大きさの構造を導入し、超高密度相界面を形成させる。このことによりもたらされる複数の新しい機能を利用し、熱電特性を著しく向上させた実用熱電材料開発の可能性が指摘されている。本研究ではナノオーダーの Si を析出させて性能向上を図るために、母相  $Mg_2Si$  からの析出物 Si の生成・成長過程を Phase-Field 法によりシミュレートした。結果

を Fig.2 に示す。母相  $\text{Mg}_2\text{Si}$  から析出する Si の形状は、アイゲン歪みのある場合、初期の球状からレンズ状に変わる。アイゲン歪みのない場合、析出する Si の形状は等方体になる。実際の実験による析出 Si の形状は、アイゲン歪みのない場合とよく一致する。母相  $\text{Mg}_2\text{Si}$  から Si が析出する際に、アイゲン歪みを有効に活用できれば、組織がラス状となりフォノン散乱を活発にして熱伝導を低下させ、熱電性能の向上が見込まれる。

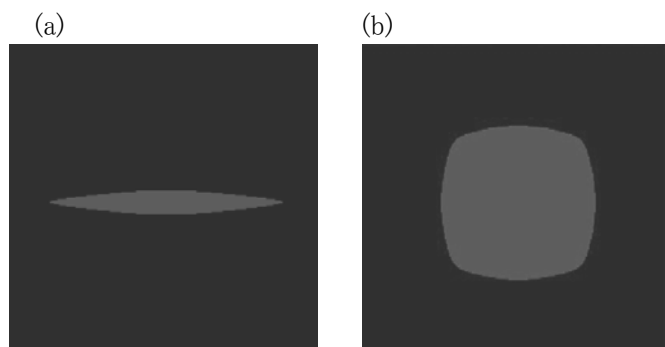


Fig.2 Morphology of precipitated Si in  $\text{Mg}_2\text{Si}$  matrix.  
(a) with and (b) without eigen-strain.

## 2.プロジェクト業績

## 研究論文等発表一覧

### 【原著論文】

- 1) N.A. Heinz, T. Ikeda, Y. Pei, G.J. Snyder, *Adv. Func. Mater.*, 24 (2014), 2135.
- 2) 武田正典、小嶋崇文、牧瀬圭正、齊藤敦、齋藤伸吾、島影尚、“進行波型カイネティックインダクタンス増幅器開発に向けた超伝導材料の検討,” 日本赤外線学会誌、24/ 2, 24-2-P02, 2015.
- 3) Y. Tamura, H. Shimakage, “Lyapunov exponent analyses of chaotic oscillations in rf-biased Josephson junctions,” *Physics Procedia*, 58, pp. 191, 2014.
- 4) J. Horikawa, A. Kawakami, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, H. Shimakage, “Evaluation of nano-slot antenna for mid-infrared detectors,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 67, pp. 21, 2014.
- 5) Yasushi Sasajima, Tatsuya Miyamoto, Takatoshi Saitoh, Takahiro Yokoyama, Jin Onuki, Effectiveness of a periodic annealing method to coarsen Cu grains in very narrow trenches, *Microelectronic Engineering*, **131**, 43-50, (2015)
- 6) S.Kumagai, S.Sato, R.Sugita, Micromagnetic study on influence of the recording field direction on transition noise of stacked media, *J. Appl. Phys.*, 115, 17B706-1-17B706-3 (2014).
- 7) A.Oyama, R.Sugita, Effect of layer thickness ratio on magnetization reversal process in stacked media with high coercivity, *EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences*, 75, 06009p.1-p.4 (2014).
- 8) N.Tomiyama, A.Oyama, S.Sato, R.Sugita, Influence of recording field direction on transition noise of stacked media, *EPJ (European Physical Journal) Web of Conferences*, 75, 06010p.1-p.4 (2014).
- 9) S.Sato, S.Kumagai, R.Sugita, Effects of sub-domain structure on initial magnetization curve and domain size distribution of stacked media, *J. Magn. Magn. Mater.*, 377, 147-152 (2014).
- 10) Yasunori Chonan, Tkashi Aoyama, K.P.Khoo, Jin Onuki, Influence of minimum barrier metal thickness at trenches on void formation in 50-nm-wide Cu wiring, *Electrochemistry* Vol.82(2014)pp.2-6
- 11) 中津欣也、宮崎英樹、齋藤隆一、大貫 仁、パワーモジュールのインダクタンス成分を低減する配線実装技術, エレクトロニクス実装学会誌 印刷中.
- 12) R. Homma, Y. Hasegawa, H. Terakado, H. Morita, T. Komine, "Simultaneous measurement of the Seebeck coefficient and thermal diffusivity for bulk thermoelectric materials", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 54, 026602/pp.1-8, 2015.
- 13) H. Kaiju, H. Kasa, T. Komine, T. Abe, T. Misawa, J. Nishii, “Magnetic Properties of Spin Quantum Cross Devices Utilizing Stray Magnetic Fields”, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol.1708, pp. vv09101-vv09106, 2014.

### 【解説,その他】

- 1) 池田輝之, 熱電材料の組織制御のために (1) 平衡状態図と各種反応, 日本熱電学会誌, 印刷中, 2015.
- 2) 池田輝之, ナノ構造化バルク熱電材料, までりあ, 53 (2014), 307.
- 3) 池田輝之, 日本熱電学会誌, 10 (2014), 35.
- 4) 大貫 仁、玉橋邦裕、篠嶋 妥、稲見 隆, LSI の高性能化を実現する高純度 Cu 配線技術, 金属, Vol.84(2014),No.1 ,pp.31-39 (2014)
- 5) 稲見 隆、大貫 仁、線幅 100nm 以下微細銅配線の結晶粒径分布評価、検査技術 Vol.19, pp.6-10 (2014)
- 6) 大貫 仁、高純度微小めっきと抵抗減少機構、めっきの世界 No.565、2月号 pp.30-35 (2015)

### 【学会発表 (国際)】

- 1) T. Ikeda, Control and stability of nanostructures of thermoelectric materials, TMS 2015, March 18, 2015, Orlando,

Florida, US (Invited).

- 2) H. Shimakage, Y. Tamura, "Chaotic oscillations in Josephson junctions for random number generation," 2014 Applied Superconductivity Conference, 2014/8/14, Sharlotte USA.
- 3) K. Iwamoto, H. Shimakage, A. Kawakami, A. Saito, M. Takeda, "Deposition conditions of CeO<sub>2</sub> buffer layers for Bi-2212 thin film fabrication," 2014 Applied Superconductivity Conference, 2014/8/12, Sharlotte USA.
- 4) J. Horikawa, A. Kawakami, S. Tanaka, M. Hyodo, M. Takeda, and H. Shimakage, "Design and evaluation of mid-infrared superconducting photon-detector with nano slot antenna," 2014 Applied Superconductivity Conference, 2014/8/12, Sharlotte USA.
- 5) A. Kawakami, J. Horikawa, M. Hyodo, S. Tanaka, M. Takeda, and H. Shimakage, "Fabrication of Superconducting Mid-infrared Photo-detectors with Dipole Nano-antennas," 2014 Applied Superconductivity Conference, 2014/8/12, Sharlotte USA.
- 6) H.Kawamura, R.Tojo, R.Sugita, Aging variation of magnetic properties and domain structure of ultra-thin CoPt perpendicular magnetic anisotropy films, INTERMAG 2014 (The 2014 IEEE International Magnetism Conference), BR-01 (2014).
- 7) H.Kawamura, K.Hayakawa, R.Sugita, Effect of interlayer interaction on domain structure of CoPt stacked films with perpendicular anisotropy, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, BW-05 (2014).
- 8) N.Tomiyama, K.Ebata, R.Sugita, Dependence of domain structure on applied field direction in stacked media, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FQ-14 (2014).
- 9) N.Nomiya, R.Sugita, Influence of layer thickness ratio on the leakage field from recorded magnetization of stacked media with high coercivity, 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, FQ-15 (2014).
- 10) Isotropic multiphase model for thermal conductivity of CaO-K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub> melts Hiromichi Ohta, Tsukasa Inose, Junpei Ojima, Hiroyuki Shibata, Sohei Sukenaga, ECTP 2014, Porto (Portugal), September 1st, 2014.
- 11) Isotropic multiphase model for thermal conductivity of silicates melts, H. Shibata, H. Ohta, T. Inose, J. Ojima, S. Sukenaga, 7th french-japanes joint workshop on frontier materials, Nantes (France), December 8th, 2014.
- 12) Tomoyo Sasaki, Mitsugu Sato, Kishio Hidaka and Jin Onuki., Beam Characterization for Scanning Electron Microscopes by the RPS and IPC Methods, CPOAbstract,2014
- 13) T. Sasaki, M. Sato, K. Hidaka, and J. Onuki, Resolution Simulation of the Practical Rayleigh Criterion Taking Account of Particle Diameter and Contrast-to-Noise Ratio for Scanning Electron Microscopes, IMCAbstract,2014
- 14) H. Kaiju, H. Kasa, T. Komine, T. Abe, T. Misawa and J. Nishii, "Magnetic Properties of Spin Quantum Cross Devices Utilizing Stray Magnetic Fields", 2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, California, Apr. 21-25, 2014.
- 15) T. Komine, and S. Saito, "First principle study of magnetocrystalline anisotropy in hcp Co with stacking faults", CQ-02, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Honolulu, Hawaii, Nov. 3-7, 2014.
- 16) H. Kaiju, H. Kasa, T. Komine, T. Abe, S. Mori, T. Misawa, and J. Nishii, "Structural and Magnetic Properties of Co-based Spin Quantum Cross Devices Utilizing Stray Magnetic Fields", GU-06, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Honolulu, Hawaii, Nov. 3-7, 2014.
- 17) T. Komine, T. Aono, and R. Ando, "Influence of eddy current on current-induced domain wall motion in a magnetic nanowire", HT-16, 59th Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, Honolulu, Hawaii, Nov. 3-7, 2014.
- 18) M. Murata, H. Terakado, R. Honma, A. Yamamoto, Y. Hasegawa, and T. Komine, "Fabrication and Thermoelectric Properties of Individual and Single-Crystal Bismuth Nanowires Encapsulated in Quartz Templates", CC9.06, Boston,



Massachusetts, Nov. 30-Dec. 5, 2014.

【学会発表 (国内)】

- 1) 大貫 仁・玉橋邦裕・篠嶋 妥・稲見 隆・永野隆敏, 高純度微小銅めっきと抵抗減少機構, 化学工学会、第46回周期大会 (招待講演)
- 2) 堀井真理, 池田輝之,  $\text{Ag}_2\text{Se}-\text{Cu}_2\text{Se}$  擬二元系状態図と組織制御, 日本熱電学会, 2014年9月29-30日, 物質・材料研究機構
- 3) 田丸祐也 池田輝之,  $\text{PbTe}$  基化合物のナノ構造化と格子熱伝導率 日本熱電学会, 2014年9月29-30日, 物質・材料研究機構
- 4) 鈴木利弥, 池田輝之, 一方向凝固を利用したバルク機能材料のハイスループットな研究法, 日本熱電学会, 2014年9月29-30日, 物質・材料研究機構
- 5) 日澤光紘, 坪内恒祐, 島影尚,  $\text{BSCCO-IJ}$  テラヘルツ発振器の特性評価方法の検討, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/9/18
- 6) 岩本恵祐, 島影尚, 川上彰, 齊藤敦, 武田正典,  $\text{CeO}_2$  バッファ層を用いた MOD 法による高品質 Bi-2212 薄膜の作製, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/9/19
- 7) 武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 島影尚, 進行波型超伝導パラメトリック増幅器開発に向けたカイネティックインダクタンス非線形性の評価, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/9/18
- 8) 堀川隼世, 川上彰, 兵頭政春, 田中秀吉, 武田正典, 島影尚, ナノスロットアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014/9/18
- 9) 川上彰, 堀川隼世, 兵頭政春, 田中秀吉, 武田正典, 島影尚, ナノアンテナを用いた超伝導中赤外光検出器の検討, 電子情報通信学会電子情報通信学会, 2015/1/22
- 10) 武田正典, 小嶋崇文, 齊藤敦, 牧瀬圭正, 鶴澤佳徳, 齋藤伸吾, 島影尚, 単結晶窒化ニオブチタン薄膜コプレーナ線路におけるカイネティックインダクタンス非線形性の評価, 電子情報通信学会電子情報通信学会, 2015/1/22
- 11) 木村寛太, 島影尚, 超伝導パラメトリック増幅器へ向けた YBCO 細線の作製と特性評価, 第22回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2014/11/22
- 12) 日澤光紘, 島影尚,  $\text{BSCCO}$  高温超伝導体を利用した固有ジョセフソン接合の特性評価, 第22回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2014/11/22
- 13) 岩本恵祐, 島影尚,  $\text{CeO}_2$  バッファ層を用いた  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板上への高品質 Bi-2212 薄膜作製, 第22回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2014/11/22
- 14) Diffraction Pattern of Si/Ge Amorphous Multi-Layer Films: Effect of Cu Addition. 第24回日本 MRS 年次大会 I-P11-026, 2014/12/11
- 15) 劉 濱, 篠嶋 妥, 岩瀬 彰宏, 熱的照射による Al-Cu 合金の析出過程の Phase-Field シミュレーション, 日本金属学会春期講演大会 P54, 2015/3/18
- 16) アハマド エサン モハマド タミディ, 江口 遼, 永野 隆俊, 太田 弘道, 佐藤 成男, 篠嶋 妥, Computer Simulation of Structural Change of Si/Ge Amorphous Multi-Layer Films under annealing: Effect of Cu Addition, 日本金属学会春期講演大会 P56, 2015/3/18
- 17) 篠嶋 妥, 岩瀬 彰宏, Al-Si アモルファス合金の照射耐性と析出促進過程の計算機実験, 日本金属学会春期講演大会 111, 2015/3/19
- 18) 小室彰也, 富山直樹, 江畑一輝, 杉田龍二, 面内記録磁場が層厚比の異なるハードディスクのトランジションノイズに及ぼす影響, 第38回日本磁気学会学術講演会, 210 (2014).
- 19) 河村春樹, 早川研人, 杉田龍二, 積層  $\text{CoPt}$  垂直磁気異方性薄膜の層間相互作用が磁区構造に及ぼす影響, 第

- 38 回日本磁気学会学術講演会, 247 (2014).
- 20) 早川研人, 河村春樹, 野宮直人, 杉田龍二, CoPt/Co/CoPt 薄膜の静磁相互作用が磁気特性に及ぼす影響, 第 38 回日本磁気学会学術講演会, 285 (2014).
- 21) 野宮直人, 杉田龍二, 高保磁力積層媒体における層厚比が再生出力に及ぼす影響, 第 22 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, A01 (2014).
- 22) 江畑一輝, 内田仁志, 河村春樹, 杉田龍二, CoPt 極薄膜の磁化反転機構, 第 22 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, A02 (2014).
- 23) 野宮直人, 大山哲広, 杉田龍二, 高保磁力積層媒体の磁化反転過程に及ぼす層厚比の影響, 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会, MR2014-37, 53-57 (2014).
- 24) 太田弘道, 依頼講演 複合材料の熱拡散率の測定と予測, 第 78 回日本熱処理技術協会秋季講演大会, 2014/11/27
- 25) 安藤伸恵, 岩野祐平, 薄井俊季, 太田弘道, 西義武, 神田昌枝, レーザフラッシュ法による面積熱拡散時間法を用いた PA6(ナイロン 6)基複合材料の熱拡散率の測定, 第 35 回日本熱物性シンポジウム, 2014/11/22
- 26) 野口 秀則, 羽鳥仁人, 岩野祐平, 安藤伸恵, 薄井俊季, 太田弘道, 周期加熱放射測温法によるサーマルインターフェースマテリアルの測定(1), 2014/11/24
- 27) CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-R<sub>2</sub>O(R=Na, K, Li)系溶融ケイ酸塩の熱伝導率と粘性係数の関係, 猪瀬司, 小嶋純平, 前園堯輝, 太田弘道, 助永壮平, 柴田浩幸, 第 35 回日本熱物性シンポジウム, 2014/11/22
- 28) CaO-SiO<sub>2</sub>-M<sub>2</sub>O(M=Li, Na, K)ケイ酸塩融体の熱伝導率, 太田弘道, 小嶋純平, 前園堯輝, 助永壮平, 柴田浩幸, 日本鉄鋼協会第 169 回春季講演大会, 2015/3/19
- 29) S. Mori, T. Misawa, H. Kasa, T. Komine, T. Abe, H. Kaiju, J. Nishii, "Spin quantum cross devices utilizing stray magnetic field", Workshop: The 1st Korea-Japan Bilateral Workshop on Functional Materials Science - Thermoelectrics, Spintronics, Low-dimensional Materials, and Soft Matter-, 北海道大学電子科学研究所, Aug. 1, 2014.
- 30) 小峰啓史, 齊藤伸, "積層欠陥を含む hcp Co の磁気異方性に関する第一原理計算", 第 38 回 日本磁気学会学術講演会, 慶応義塾大学, 2014 年 9 月 5 日.
- 31) 森澄人, 三澤貴浩, 笠晴也, 小峰啓史, 阿部太郎, 海住英生, 西井準治, "漏洩磁場を用いたスピン量子十字デバイスの磁気特性" [17p-S2-34], 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月 17 日.
- 32) 村田正行, 山本淳, 寺門宏樹, 本間亮英, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "鋳型圧入法による Bi ナノワイヤーの開発と熱電物性の評価" [18p-A6-8], 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月 18 日.
- 33) 村田正行, 山本淳, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "Bi-Sb 系バルク材料の作製と熱電物性の評価" [18p-A7-3], 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月 18 日.
- 34) 村田正行, 山本淳, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "直径 700nm Bi ナノワイヤーのホール係数測定とキャリア移動度評価" [18p-A7-14], 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 2014 年 9 月 18 日.
- 35) 村田正行, 山本淳, 本間亮英, 寺門宏樹, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "Bi-Sb 系バルク材料の熱伝導率評価", 第十一回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2014), つくば, 2014 年 9 月 29-30 日.
- 36) 本間亮英, 寺門宏樹, 長谷川靖洋, 小峰啓史, 森田寛之, "バルク熱電材料の熱拡散率とゼーベック係数の同時測定法の開発" 第十一回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2014), つくば, 2014 年 9 月 29-30 日.
- 37) 寺門宏樹, 本間亮英, 長谷川靖洋, 小峰啓史, 森田寛之, 山寄正明, 寺嶋徹, "引き伸ばし法を用いて作製した Bi マイクロ/ナノワイヤーの熱電物性の直径依存性", 第十一回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2014), つくば,

2014年9月29-30日.

- 38) 森田寛之, 寺門宏樹, 本間亮英, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "3 $\omega$ 法によるワイヤー系熱電材料の熱伝導率評価", 第十一回日本熱電学会学術講演会 (TSJ2014), つくば, 2014年9月29-30日.
- 39) 村田正行, 山本淳, 長谷川靖洋, 小峰啓史, "石英ガラスを利用した Bi ナノワイヤーの作製と熱電物性の評価", 日本機械学会第6回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 島根, 2014年10月20-22日.

#### 【受賞等】

- 1) 受賞者名: 野宮直人, 受賞名: 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会委員長賞, 授与者: 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会委員長, 受賞日: 2014/12/12

#### 【特許】

- 1) 発明者: 池田輝之, ジェフリー・スナイダー, 出願人: 科学技術振興機構, カリフォルニア・インスティテュート・オブ・テクノロジー, 発明の名称: 「熱電材料の製造方法, 熱電材料及び熱電変換素子」, 特許第5545586 (2014年5月23日)
- 2) 発明者: Teruyuki Ikeda, Jeffrey G. Snyder, 出願人: Japan Science and Technology Agency, California Institute of Technology, 発明の名称: Method for manufacturing thermoelectric material, US 8728340 B2 (2014年5月20日).
- 3) 発明者: 篠嶋 妥, 大貫 仁, 永野 隆敏, 出願人: 国立大学法人茨城大学, 発明の名称: 「超低抵抗率銅配線を有する半導体集積回路装置」, 出願番号: 特願 2015.
- 4) 玉橋邦裕, 千葉秋雄他 3 名, 合金接合材による接合層構造及びその形成方法、並びに該接合層構造を有する半導体装置及びその製造方法、特願 2014-203676 平成 26 年 10 月 2 日出願
- 5) 大貫 仁、玉橋邦裕、千葉秋雄他 3 名, 合金接合材による接合層構造及びその形成方法、並びに該接合層構造を有する半導体装置及びその製造方法、特願 2014-248826, 平成 26 年 12 月 9 日出願

#### 【新聞報道等】

- 1) 「グリーンデバイス 最先端の研究を」, 日刊工業新聞, 掲載日: 2014/6/20
- 2) 「産総所の企業連携&VB 支援 熱拡散率の非接触測定」, 日刊工業新聞, 掲載日: 2014/11/20
- 3) 「300度C耐久の無鉛ハンダ」, 日刊工業新聞, 掲載日: 2015/1/12
- 4) 「はんだ 300 度耐熱」, 日本経済新聞, 掲載日: 2014/12/17

#### 【競争的資金獲得】

1. 申請した競争的資金等の外部資金
- 1) 村田学術振興財団, 超微細固相析出粒子を分散させたバルクシリコンの創製と熱電特性, 3,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 2) カシオ科学振興財団 研究助成, 流体を流すことができるポーラスシリコン熱電材料の創製と新しい熱発電素子, 5,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 3) 一般社団法人日本ガス協会 大学等研究助成金, 燃焼ガス透過性多孔質熱電材料を用いた新しい熱発電, 1,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 4) (公財) JFE21 世紀 地球環境・地球温暖化防止技術研究, ガス透過型熱電デバイスの創製と新しい熱エネルギー回収, 2,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 5) キヤノン財団 産業基盤の創生, 一方向に孔の揃った多孔質熱電材料を用いた新しい熱発電技術, 20,000 千円, 研究代表者: 池田輝之

- 6) 岩谷直治記念財団 岩谷科学技術研究助成, 多孔質熱電材料を利用した新しいガス燃焼発電, 2,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 7) 旭硝子財団 環境研究 近藤次郎グラント, 一方向に孔の伸びた多孔質熱電材料と新しいガス燃焼同時発電システム, 7,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 8) JST A-STEP (探索タイプ), 一方向に孔の揃った多孔質熱電シリコンの創製と新しいガス燃焼同時発電, 1,700 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 9) NEDO エネルギー・環境新技術先導プログラム, 革新的ナノスケール制御による高効率熱電変換システムの実現—変換効率 30%を超えて—, 100,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 10) (公財)徳山科学技術振興財団, 熱電材料の多孔質化と新しいガス燃焼同時発電技術, 2,000 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 11) (公財)池谷科学技術振興財団, 熱電材料の多孔質化, 1,500 千円, 研究代表者: 池田輝之
- 12) 平成 27 年度 軽金属奨学会 教育研究資金「アルミニウム合金における照射エネルギーを利用した組織制御プロセスの探索」(2 年目) 研究代表者: 篠嶋 妥
- 13) 第 45 回(平成 26 年度)三菱財団自然科学研究 公益財団法人 三菱財団, 「拡散を利用した熱流-スピン流変換」, 20,000 千円, 2014 年度-2015 年度, 研究代表者: 小峰啓史
- 14) 平成26年度研究開発助成 公益財団法人 御器谷科学技術財団, 「ナノインプリント法による高性能ナノワイヤアレイ熱電素子の開発」, 1,000 千円, 2015 年度, 研究代表者: 小峰啓史
- 15) 平成26年度倉田奨励金 公益財団法人 倉田記念日立科学技術財団, 「電流磁場セルフアシストを利用した積層型磁壁移動デバイスの高速化」, 3,000 千円, 研究代表者: 小峰啓史

## 2.申請した科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成 27 年度 挑戦的萌芽研究, 「一方向性気孔をもつ多孔質熱電材料の創製と新しい熱発電システム」, 5,000 千円, 2015 年度～2016 年度, 研究代表者: 池田輝之
- 2) 文部科学省 平成 27 年度 基盤研究(C), 「歪エネルギー駆動による超微細 Cu 配線の結晶粒粗大化プロセス開発」, 4,315 千円, 2015 年度～2017 年度, 研究代表者: 篠嶋 妥
- 3) 文部科学省 平成 27 年度 基盤研究(A), 「イオン・レーザー複合照射場による超非平衡合金構造創製と物性制御への応用」, 2,000 千円(分担), 2015 年度～2018 年度, 研究代表者: 岩瀬 彰宏
- 4) 文部科学省 平成 27 年度 特別推進研究, 「超塑性現象適用による新接合技術の開発と適用によるワイドバンドギャップ半導体性能の革新」, 6,000 千円(分担), 2015 年度～2019 年度, 研究代表者: 大貫 仁
- 5) 文部科学省 平成 27 年度 基盤研究(C), 「高放射性廃棄物固化用硼珪酸塩融体の熱伝導率の理論予測」, 4,850 千円, 2015 年度～2017 年度, 研究代表者: 太田弘道
- 6) 文部科学省 平成 27 年度 基盤研究(B), 「珪酸塩融体中における高配位アルミニウムイオンの融体物性への影響」, 19,980 千円, 2015 年度～2018 年度, 研究代表者: 柴田浩幸
- 7) 文部科学省 平成27年度 基盤研究(B), 「強磁性ナノ接合を用いた巨大磁気キャパシタンス効果素子の創製」, 19,880 千円, 2015 年度～2017 年度, 研究代表者: 北海道大学海住英生
- 8) 文部科学省 平成27年度 基盤研究(B), 「ナノスケール制御によるナノワイヤー熱電変換素子の巨大ゼーベック効果発現と機構解明」, 19,900 千円, 2015 年度～2018 年度, 研究代表者: 埼玉大学長谷川靖洋
- 9) 文部科学省 平成27年度 基盤研究(C), 「ディラック電子系に対する量子ドット導入による熱電性能の増強」, 5,000 千円, 2015 年度～2018 年度, 研究代表者: 茨城大学青野友祐
- 10) 文部科学省 平成27年度 挑戦的萌芽研究, 「磁気ナノ構造体における室温スキルミオンの発現とその低電流密度駆動」, 4,750 千円, 2015 年度～2016 年度, 研究代表者: 北海道大学海住英生

- 11) 文部科学省 平成27年度 挑戦的萌芽研究,「二次電子放出の違いによる絶縁体中ナノ導体位置特定と局所電極形成による電気物性測定」, 5,000 千円, 2015 年度～2017 年度, 研究代表者:北海道大学海住英生

### 3.採択された競争的資金等の外部資金

- 1) 一般社団法人 日本ガス協会 大学等研究助成金,「燃焼ガス透過性多孔質熱電材料を用いた新しい熱発電」, 1,000 千円, 研究代表者:池田輝之
- 2) (公財)JFE21 世紀財団 2014 年度技術研究助成 (地球環境・地球温暖化防止技術研究)「ガス透過型熱電デバイスの創製と新しい熱エネルギー回収」, 2,000 千円, 研究代表者:池田輝之
- 3) 軽金属奨学会 教育研究資金「アルミニウム合金における照射エネルギーを利用した組織制御プロセスの探索」, 250 千円, 2014 年度, 研究代表者:篠嶋 妥
- 4) 平成 26 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業「欠陥を事前予測し実用性を高めたシミュレーションによる複雑一体部品の一気通貫鋳造法の開発」, 683 千円, 研究代表者:太田弘道
- 5) 委託研究 IHI「廃棄物に応じたガラス固化体の高温特性評価」44,860 千円, 研究代表者:太田弘道
- 6) 平成 26 年度物質・デバイス領域共同研究拠点共同研究 研究珪酸塩融体のネットワーク構造と熱物性 100 千円, 研究代表者:太田弘道
- 7) 平成 26 年度 独立行政法人科学技術振興機構 研究成果最適展開支援事業(A-STEP)【ハイリスク挑戦タイプ(復興促進型)】、7,600 千円、研究代表者:大貫 仁
- 8) 平成 26 年度 独立行政法人科学技術振興機構 研究成果最適展開支援事業(A-STEP)【シーズ育成タイプ】、32,852 千円、研究代表者:大貫 仁
- 9) 平成26年度倉田奨励金 公益財団法人 倉田記念日立科学技術財団,「電流磁場セルフアシストを利用した積層型磁壁移動デバイスの高速化」, 1,000 千円, 研究代表者:小峰啓史

### 4.採択された科学研究費補助金

- 1) 文部科学省 平成 26 年度 基盤研究(B),「高エネルギー非平衡状態を利用した熱電材料のナノ構造化と新機能」, 14,950 千円, 2014 年度～2016 年度, 研究代表者:池田輝之
- 2) 文部科学省 平成 25 年度 基盤研究(B),「3 次元実装用低ひずみ・高アスペクト比 TSV 開発」, 13,260 千円, 2013 年度～2014 年度, 研究代表者:大貫 仁
- 3) 文部科学省 平成 24 年度 基盤研究(C),「エネルギーアシスト記録及び瓦記録方式ハードディスク対応超高速サーボ信号転写の研究」, 5,460 千円, 2012 年度～2014 年度, 研究代表者:杉田龍二
- 4) 文部科学省 平成 26 年度 挑戦的萌芽研究「倒置・超短時間レーザフラッシュ法による放射性物質固化用ガラス融体の熱伝導率の研究」, 3,900 千円, 2012 年度～2014 年度, 研究代表者:太田弘道
- 5) 文部科学省 平成26年度 基盤研究(C),「超高記録密度積層構造ナノワイヤメモリの低電流・高速動作に関する研究」, 5,000 千円, 2013 年度～2015 年度, 研究代表者:小峰啓史

茨城大学重点研究

「グリーンデバイス開発研究」

茨城大学工学部附属グリーンデバイス教育研究センター

2014年度報告書

発行日 平成27年4月

発行者 茨城大学 工学部 マテリアル工学科  
教授 池田 輝之  
〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1  
Tel: 0294-38-5066 Fax: 0294-38-5226

※禁無断転載

茨城大学重点研究

<http://www.ibaraki.ac.jp/generalinfo/activity/researching/juuten/>

茨城大学工学部附属教育研究センター

<http://www.eng.ibaraki.ac.jp/research/centers/index.html>

グリーンデバイス教育研究センター

<http://www.eng.ibaraki.ac.jp/research/centers/device/index.html>