

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560838

研究課題名(和文) 新奇な熱電材料設計：ナノサイズ格子の原子配置ランダム化による移動度向上機構の検討

研究課題名(英文) Research of High Performance Thermoelectric Materials with Nano-size Cages by focusing Random Host Structure of Quaternary Sn-based Clathrate Semiconductors

研究代表者

赤井 光治 (AKAI, KOJI)

山口大学・大学情報機構・准教授

研究者番号：20314825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノサイズのカゴ状構造を有するBa-Ga-Snクラスレート半導体において、ホスト格子を形成するIII族元素とIV族元素の配置がランダムであるにも関わらず熱電材料として高い可能性を有すること注目し、更にランダム性が増すような元素置換をすることで、熱電性能の向上を行う可能性について検討した。具体的にはゲスト原子のダブル置換およびホスト原子のダブル置換をそれぞれ行い、理論的に電子構造計算および計算されたバンド構造を用いた熱電性能解析を行った。また、実験的には、理論的に熱電性能の向上が期待される物質に対して、材料合成および熱電特性測定を行った。

研究成果の概要(英文)：We studied improve of a thermoelectric performance for Ba-Ga-Sn clathrate semiconductors with nano-size caged structure. The Sn-based clathrates have high abilities as high performance the rmoelectric materials, in spits of a random structure of Ga and Sn in the host lattice. Therefore it is expected that transport properties are robust for additional element doping in Ba-Ga-Sn. In this study we tried to enhance the mobility of carrier by atomic doping to host sites or guest sites. In theoretical approaches we calculated the electronic structure by an ab-initio method and calculated the thermoelectric properties by using calculated band structure. In the calculation of the thermoelectric properties the semi-classical theory was used by the Boltzmann equation. In the experimental researches, new materials were synthesized, and a thermoelectric power, an electrical conductivity, and a thermal conductivity were measured.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 構造・機能材料

キーワード：熱・エネルギー材料 熱電クラスレート半導体

1. 研究開始当初の背景

本研究で注目しているカゴ状構造を有するクラスレート半導体は高性能熱電変換材料として注目されている。

熱電変換とは物質に温度差を与え、熱流を物質内に発生させると、電流が生じる現象である。熱源があれば、室温との温度差を利用し発電できることから、工場廃熱や自動車廃熱などの廃熱を利用した省エネ発電技術として興味が持たれている。この熱電発電で鍵になるのが、熱からどれだけ電気を発生させることができるかであり、熱電変換のエネルギー変換効率である。このエネルギー変換効率は材料が持つ性能指数 Z 、もしくはそれに絶対温度 T を掛け、無次元性能指数 ZT により特徴づけられる。この性能指数は材料の物性値を用いて以下のように表される。

$$Z = S^2 \sigma / (\kappa_e + \kappa_L)$$

ここで、 S は熱電能であり、材料内の温度勾配とそれに比例する電位差との間の比例係数であり、熱電能が大きいくほど大きな起電力が得られる。 σ は電気伝導率であり、値が大きいくほど材料内でのエネルギー損失が小さい。 κ_e および κ_L は熱伝導率に対するキャリア寄与と格子振動による寄与をそれぞれ表している。熱伝導率が小さいほど材料内の温度差が大きくなると共に、熱の消費量が少なくなる。このように、高性能熱電変換材料には、熱電能および電気伝導が大きく、熱伝導が小さいことが求められる。しかし、一般に、これら3つの物質量は競合関係にある。例えば、不純物や欠陥の少ない綺麗な材料はキャリア伝導と格子振動による伝導（格子伝導と言う）の両方がよくなり、電気伝導が大きくなると共に熱伝導も大きくなる。また、キャリア濃度の高い材料では電気伝導が高いが、起電力である熱電能が小さくなる。これらの競合関係が熱電材料の開発を難しくしている。

熱電変換技術の利点の1つが、材料に温度差を付けるだけで電気エネルギーを直接得ることができることにある。熱電発電では熱機関による発電システムとはことなり、可動する部分がない。システムのメンテナンス性、信頼性は極めて高い。一方、熱電システムのエネルギー変換効率は10%が実用化の目安とされ、熱機関に比べ、エネルギー変換効率が低い。この技術における最大の課題はエネルギー変換効率の向上。性能指数の高い材料の開発にある。

高効率な熱電変換材料の開発の1つの指針が性能指数の分母に現れる格子熱伝導の低減である。熱電効果は固体内の電子プラズマの熱拡散現象を利用しており、キャリア伝導が熱電効果を引き起こしている。一方、格子熱伝導は直接的に熱電変換効果に寄与せず、熱電変換効率との意味では熱リークとしてのみ作用する。このため、格子伝導が小さく、キャリア伝導が大きい物質が熱電変換材料として求められることになる。

カゴ状構造を持つクラスレート半導体は

カゴ状構造を形成するホスト原子間が半導体 Si などと同様に共有性の高い結合でつながっており、それらが格子ネットワークを成している。そのようなホスト格子では、Si 結晶に見られるように高いキャリア移動度が期待できる。一方、格子伝導が高くなることも予想される。しかし、カゴ内に原子を内包するクラスレートの熱伝導率はガラス的な振る舞いを示し、低い格子熱伝導率を持つ。これは、カゴに内包されるゲスト原子がカゴ内ではかなり自由に動くことが可能で、非線形な原子振動がホスト格子伝導を阻害しているためであり、ラットリング効果と言われる。これにより、クラスレート半導体は高効率な熱電材料に求められる「格子伝導が低く、キャリア伝導が高い」性質が期待でき、高い可能性を持つ。

このような、クラスレート半導体における、高性能熱電変換材料としての課題はキャリア移動度の向上にある。格子熱伝導率はガラス並みに低い値を持ち 1w/mK 程度もしくはそれ以下の値が実現している。一方、キャリア移動率は半導体としては比較的低い値にあり、 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度もしくはそれ以下の値にとどまっている。これに対し、我々はクラスレート構造の多様性に注目し、サイズの異なるカゴ構造を利用し、ラットリング効果により格子伝導を低減するゲスト系とホスト格子ネットワークと大きな混成を持ち、キャリア伝導を起こすゲスト系の2種類の機能を空間的に分離することで、高いキャリア伝導を持つクラスレートの可能性を研究した。これにより、カゴのサイズに応じ、ゲスト原子を選択することで、キャリア伝導経路を制御できることを理論的に明らかにした。実験的にはクラスレート合成におけるナノスケールでの構造制御の確立に向けチャレンジを継続している。

このような、クラスレート半導体の熱電性能に対する高性能化研究、特にキャリア移動度の向上に向けた取り組みを行ってきた。

2. 研究の目的

熱電変換材料として興味が持たれるカゴ状構造を有するクラスレート半導体はカゴ内に入るゲスト原子はアルカリ金属元素やアルカリ土類金属元素が用いられる。カゴを構成するホスト格子はIV族元素がベースとなる。IV族元素であるSi, Ge, Snの全てが、高性能熱電材料の可能性を持っているが、本研究では特にSn系に注目している。

Sn系の興味深い点は以下の2点である。1つは、熱電材料としてのピーク温度が 200°C から 300°C 付近にあること。これは、廃熱発電において、廃熱の熱源の多くが 400°C 以下であり、熱電応用を実現する上で重要な可能性を持つためである。2つ目はp型とn型の両方のキャリア制御が可能なこと。これも、熱電応用に関係しているが、熱電素子はn型とp型を対にした構造を持ち、2つ

のキャリア特性を持つ材料が要求されるためである。この Sn クラスレート半導体の代表的な物質が Ba-Ga-Sn 系である。この系は、Ba がゲスト原子、Sn および Ga がホスト原子である。クラスレート系の特徴として、ゲスト原子がホスト格子にキャリアを供給するため、Ba-Ga-Sn のように価数の異なるホスト原子で置換し、ホスト格子のキャリアを調整し、半導体になっている。Ba-Ga-Sn 系では単位格子の化学量論的な組成が $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$ の場合に真性半導体になる。この時、通常の化合物半導体とはことなり、Ga/Sn の配置はランダムであり、ホスト格子に合金的なランダム性を持つ半導体である。クラスレート半導体ではこのように 3 元系が基本となる。

一般に、物質のキャリア伝導にとって原子配置のランダム性、つまり、ポテンシャルのランダム性は性能低下の要因となる。ところが、クラスレート系ではランダム性を有するにもかかわらず熱電材料として高い可能性を持っている。そこで発想を変え、本研究の目的は、更にランダム性を増加させることで、このクラスレート系の熱電性能の高性能化を進めることができないかを検討することにある。

ホスト格子内にはイオン化した III 族原子がランダムポテンシャルを作っており、更にランダム化を起こさせる第 4 元素添加を行っても、ランダム化の影響が相対的に小さく、新たに元素置換したランダム性とは異なる効果が効果的に発現する可能性を持つ。通常物質では元素置換はキャリアの移動度の低下を引き起こし、全体の性能低下を招くことが懸念される。このように、ランダム性を有するクラスレート系固有の熱電高性能化に対する物質設計指針の可能性があると考え、新奇熱電材料の開発を検討した。

具体的な研究内容は以下の通りである。(1) Ba-Ga-Sn 系に対するゲスト原子のランダム化による高性能化の検討。(2) Ba-Ga-Sn 系に対するホスト原子のランダム化による高性能化の検討。(3) Ba-Ga-Sn 系のホスト格子におけるランダム構造の解明。

3. 研究の方法

本研究における熱電変換材料の研究については、理論的なアプローチと実験的なアプローチの両面から、お互いに連携しながら、進めた。理論的なアプローチでは、クラスレート半導体の電子状態計算や熱電特性計算について、第一原理計算手法を用いた。これにより、最適構造や電子構造についての情報を得た。これらの情報および実験からの知見を加味しつつ、熱電能や電気伝導、熱伝導など熱電物性に関わる物理量の計算を行い、熱電材料としての可能性を計算した。

また、ホスト構造の解明では、原子間の相互作用を第一原理計算から求め、それに用い、熱平衡分布を仮定したモンテカルロシミュ

レーションにより、大きなスーパーセル内での原子配置を計算した。

実験的なアプローチでは、クラスレート材料の合成に、アーク溶融および SPS 焼結を用いた。また、それらの試料について、X 線構造解析、組成分析、熱電特性の測定を行った。

4. 研究成果

(1) ゲスト原子のランダム化による高性能化の検討。

Sn クラスレート Ba-Ga-Sn 系では合成プロセス制御により同じ組成を持ち結晶構造の異なる (タイプ I 型構造とタイプ VIII 型構造) の材料を選択的に作成することが可能である。図 1、図 2 にタイプ I 構造とタイプ VIII 構造の結晶構造をそれぞれ示す。タイプ I 構造では 2 種類のカゴ構造を持ち、1 つが 12 面体、もう 1 つが 14 面体で、それぞれゲスト原子を 1 つ包含している。図 1 では 12 面体内のゲスト原子 (2a サイト) をダークグレイで、14 面体内のゲスト原子 (6d サイト) をライトグレイで示している。また、ホスト構造については、3 種類のサイトがあり、6c (橙色)、16i (青色)、24k (緑色) で示している。一方、図 2 のタイプ VIII 構造ではゲスト原子 (ダークグレイ、8c) を内包するカゴは 1 種類であり、それを取り囲むホスト構造には 4 種類のサイト、2a (紫色)、8c (橙色)、12d (青色)、24g (緑色) がある。

これらの構造を持つ Sn クラスレートについてであるが、タイプ I 構造は熱的な安定性に乏しく準安定状態とされている。タイプ I 構造とタイプ VIII 構造を比較すると、タイ

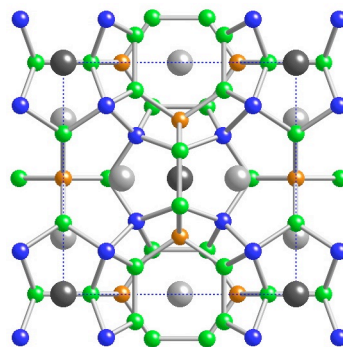


図 1: タイプ I クラスレートの結晶構造

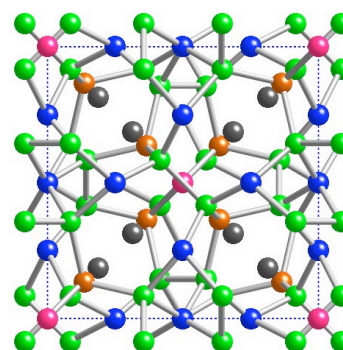


図 2: タイプ VIII クラスレートの結晶構造

プ I 構造の方がラットリング効果による格子熱伝導率の低下が強く働く。また、異なるサイズのカゴを有するタイプ I 構造にすることで Si 系や Ge 系で進めていたキャリア伝導経路制御効果が活用できる可能性も考えられ、Ba-Ga-Sn 系の高性能化が期待される。タイプ VIII 構造に比べタイプ I の方がサイズの大きなカゴを有することから、イオン半径の大きいゲスト原子を混ぜ、タイプ VIII 構造のままではゲスト原子が窮屈になるようにすることで、カゴサイズの多様性に富むタイプ I 構造の安定化ができないかを調べた。

計算は $\text{Rb}_x\text{Ba}_{8-x}\text{Ga}_{16}\text{Sn}_{30}$ について、 $x=0, 1, 3, 4$ の場合に行った。計算された単位格子当たりの全エネルギーは $x=0$ の場合を除き、タイプ I 構造の方がエネルギー的に安定であることが分かった。また、 $x=0$ つまり Rb 無置換ではタイプ VIII の方がエネルギー的に安定であり、そのエネルギー差は 0.45eV であった。この結果は、実験結果と整合性を持ち、計算結果の妥当性を示す。

計算では、 $x=1$ の Rb 置換量で既にタイプ I 構造の方がエネルギーは低くなり、Rb 置換がタイプ I 構造の安定化に大変有効であることがわかる。また、この場合で単位格子当たりのエネルギーは 0.23eV の差があり、熱的に安定であることが示唆される。

また、バンド構造についてであるが、Rb 置換は価電子帯のバンド構造にほとんど影響を及ぼさず、無置換の場合とほぼ同じであることが分かった。これにより、Rb 置換が移動度におよぼす影響は小さく、良好なキャリア輸送特性を示すことが期待できる。

以上の理論的な結果をふまえ、実際にタイプ I 構造が安定化できるかどうかについて、Rb 置換サンプルを作成し検証実験を行った。残念ながら、実験結果はタイプ I にはならず、タイプ II 構造になることが分かった。タイプ I より更に大きなカゴを持つ構造である。このため、タイプ I 以上に高い熱電性能が得られる可能性もある。これに対する熱電性能の高性能化の可能性に対する検討は今後の課題である。

(2) ホスト原子のランダム化による高性能化の検討

クラスレート半導体 Ba-Ga-Sn 系では n 型に比べ、p 型性能が低いことが課題となっている。この理由について理論的な検討を行った結果、欠損の可能性があることが分かった。タイプ VIII 構造では 4 つのホストサイト: 2a, 8c, 12d, 24g がある。これらのそれぞれに欠損が入った場合について電子構造計算による検討を行い、12d サイトに欠損がある可能性が明らかになった。この欠損では伝導電子については影響が小さいが、価電子帯のホールについては影響が大きい。この欠損の起源としてホスト原子のイオンサイズの違いが考えられる。ホスト格子を構成する Sn と Ga のイオン半径はそれぞれ 1.40\AA と 1.26\AA であり、イオン半径に 0.1\AA 以上の差がある。

このイオン半径の違いによる格子ひずみの緩和にはどちらのホスト原子に対してもひずみが均等になるよう原子数比を 1:1 に近づけることが考えられる。そのため、には III/V 族の共ドーブと IV 族ドーブの可能性がある。

① Ga と Sb の共ドーブ

この系に対する熱電特性計算の結果、バンド構造は伝導帯および価電子帯、共に大きな影響が無いことが分かった。しかし、伝導帯のバンド端近傍の有効質量が大きくなっており、n 型キャリアの移動度低下が予想される。これは、p 型材料に取っては、逆に熱電性能の向上の可能性を持つことが、熱電特性の理論的な解析から明らかになった。つまり、ランダム化による高性能化が期待できることが分かった。

② Ge 添加

この場合は、Sn のイオン半径を Ga とほぼ同じイオン半径を持つ Ge 原子で置き換えることを行っている。この場合に、ホスト構造に与える影響を電子構造計算の手法を用いて調べた。計算結果から、Ge 置換は Ga 配置に影響を与えないことが分かった。一般に、クラスレート半導体内で Ga はアニオンとして存在しており、キャリア伝導におよぼす影響が大きい可能性がある。しかし、Ga 配置に影響が無いことから Ge 添加が熱電性能向上に有効であることを示唆している。この点を確かめるため、Ge 添加した Ba-Ga-Sn のバンド構造を計算し、バンド構造への影響も小さいことを確かめた。

実験的なアプローチとして Ba-Ga-Ge-Sn の合成を行い熱電特性の評価を行った。Ge 添加を行うことにより、移動度が向上し、熱電性能指数が約 2 倍になる結果となった。これにより、Ge 添加が Ba-Ga-Sn の熱電性能向上に極めて有効であることが明らかとなった。

以上のように、ホスト原子のダブル置換を行うことで熱電性能の向上を行う可能性について、極めて有望な材料設計の指針を明らかにすることができた。

③ ホスト原子のランダム構造の解明

更に、ランダム化による熱電性能の向上を進める上で、3 元系クラスレートのホスト格子が持つランダム構造の解明は大変重要である。このため、ホスト構造の要となる Ga 分布について計算した。

計算では Ga 周りの最近接原子との相互作用のみを考慮する最近接相互作用モデルと最近接相互作用に加え、Ga 間および Ga-Ba 間の長距離クーロン相互作用を考慮するイオンモデルの 2 つのモデルについて研究を行った。しかし、最近接相互作用モデルでは計算精度が不十分である可能性を示唆する計算結果となった。このため、以下、イオンモデルによる計算結果を示す。

まず、実験的に示されている Ga の 4 種類のサイトに対する占有率を計算した。計算値は実験値と良い一致を示し、計算結果の妥当性が確認できた。

単位格子当たり Ga 数が平均 16 個になるように、全体の Ga 数を調整した場合（このとき真性半導体になる）を計算した。この場合、平均的には Ga 数密度が 16 個/単位格子であるが、熱平衡分布を仮定して計算しており、実際には空間的な Ga 分布にゆらぎが生じている。この Ga 分布のゆらぎを評価するため、各単位格子内の Ga 数を比較した。この結果、単位格子間で約 1 個の Ga 数のゆらぎがあることが分かった。これは、完全に Ga をランダムに配置した場合に比べ、1/3 程度のゆらぎの大きさとなっている。つまり、長距離のクーロン相互作用の効果により Ga 分布が抑制されていることを明らかにした。更に、長波長スケールの Ga 分布ゆらぎを計算した結果、長波長スケールでは更にクーロン相互作用によるゆらぎの抑制効果が強く働き、長波長極限では、ゆらぎが消失することが分かった。

これらの研究により、クラスレート半導体における熱電性能の高性能化に対するランダム化の可能性を明らかにすることができた。実用化には更なる高性能化、およびランダム化による可能性の探究が不可欠であるが、本研究を発展させ、熱電性能指数 ZT が 2 を越える新奇な熱電材料開発の方向性が得られた。今後、この方向性に従い、研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

- ① K. Akai, K. Kishimoto, T. Koyanagi, Y. Kono, S. Yamamoto, "First-Principles Study of Electronic Structure and Thermoelectric Properties of Ge-Doped Tin Clathrates", *J. Electr. Mater.* **43**, 2081-2085 (2014). 査読有
- ② K. Kishimoto, H. Yamamoto, K. Akai, T. Koyanagi, "Effect of Ge substitution on carrier mobilities and thermoelectric properties of sintered p-type $Ba_8Ge_{16+x}Sn_{30-x-y}Ge_y$ with the type-VIII clathrate structure", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 445306/1-8 (2012). 査読有

〔学会発表〕（計 13 件）

- ① 松本浩一, 赤井光治, 岸本堅剛, 栗巢普輝, 小柳剛, 山本節夫, 「イオンモデルによる Sn クラスレート半導体 $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$ における Ga 分布ゆらぎの解析」, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 p. 09-110 (19a-F11-3, 2014 年 3 月 19 日. 青山学院大学 (相模原))
- ② K. Akai, K. Kishimoto, T. Koyanagi, Y. Kono, S. Yamamoto, "Study of Host-atoms Substitution Effects for Electronic

Structure and Thermoelectric Properties on Sn-based Clathrates", 11th European Conf. on Thermoelectrics (ECT 2013) p.109, (P_077, Nov. 20, 2013, ESA/ESTEC, Noordwijk, Netherlands)

- ③ K. Akai, K. Kishimoto, Y. Kono, S. Yamamoto and S. Shimamura, "Study of alloys effects for electronic structure on Sn-base Clathrates", Program & Abstracts of 8th ACCMS-V0 PS-19 (2013, Nov. 7, Tohoku Univ. (Sendai))
- ④ K. Akai, K. Kishimoto, T. Koyanagi, Y. Kono, S. Yamamoto, "First-principles study of electronic structure and thermoelectric properties on Ge doped Tin clathrates", 32th international conference on thermoelectrics (P138, 2013, 6 月 30 日 - 7 月 30 日, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan)
- ⑤ 赤井光治, 岸本堅剛, 河野欣, 小柳剛, 山本節夫, 「クラスレート半導体 $Ba_8Ga_{16}Sn_{30}$ の電子構造に対する Ge 置換効果の計算」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 p. 09-113 (29a-PB4-4, 2013 年 3 月 29 日, 神奈川工科大学 (厚木))
- ⑥ 岸本堅剛, 小柳剛, 赤井光治, 「熱電クラスレート $Ba_8M_{16}Ge_{30}$ ($M = Al, Ga, In$) のキャリア移動度」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 p. 09-087 (27a-B9-7, 2013 年 3 月 27 日, 神奈川工科大学 (厚木))
- ⑦ 赤井光治, 河野欣, 岸本堅剛, 「タイプ 8 構造を持つ 4 元系 Sn クラスレートにおける電子状態と熱電特性」, 第 68 回年次大会日本物理学会講演概要集第 4 分冊 p. 899 (26aXF-11, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 (東広島))
- ⑧ 赤井光治, 岸本堅剛, 小柳剛, 河野欣, 山本節夫, 「Sn クラスレートの熱電特性に対する原子置換の効果」, 第 10 回日本熱電学会学術講演会予稿集, p. 46 (S13-1, 2013 年 9 月 8-9 日, 名古屋大学 (名古屋))
- ⑨ K. Akai, Y. Kono, K. Kishimoto, S. Yamamoto, S. Shimamura, "Study of Electronic structure and Thermoelectric Properties on Ba-Ga-Sn Clathrate", The seventh General Meeting of ACCMS-V0 Program and Abstracts, PS-39 (2012 年 11 月 23-25 日, Tohoku Univ., Sendai, Japan)
- ⑩ 赤井光治, 河野欣, 岸本堅剛, 小柳剛, 山本節夫, 「ダブル置換型クラスレート半導体におけるマイナーキャリアのバンド構造制御による高性能化の検討」, 第 9 回日本熱電学会学術講演会予稿集 p. 41 (2012 年 8 月 27 日 東京工業大学 (東京))
- ⑪ 松本浩一, 赤井光治, 岸本堅剛, 栗巢普輝,

小柳剛, 山本節夫、「III-IV 族クラスレート半導体における III 族原子の分布ゆらぎに関する計算」、第 9 回日本熱電学会学術講演会 予稿集 p. 39 (2012 年 8 月 27 日 東京工業大学 (東京))

⑫ K. Akai, K. Kishimoto, T. Koyanagi, Y. Kono, S. Yamamoto, "First-principle study of crystal structure for alkali metal doped Tin clathrate Ba-Ga-Sn", 31st Int. Conf. on Thermoelectrics Abstract Book, p.172 (A4_1, 2012 年 7 月 9-12 日, Aalborg, Denmark)

⑬ 赤井光治, 岸本堅剛, 小柳剛, 河野欣, 山本節夫、「電子構造計算手法を用いた Rb 元素添加によるクラスレート半導体 Ba-Ga-Sn の構造制御の検討」、第 59 回応用物理学会関連連合講演会 講演予稿集 p. 09-075 (16p-DP2-8 2012 年 3 月 16 日, 早稲田大学 (東京))

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤井 光治 (AKAI KOJI)
山口大学・大学情報機構・准教授
研究者番号：20314825

(2) 研究分担者

岸本 堅剛 (KISHIMOTO KENGO)
山口大学・理工学研究科・助教
研究者番号：50234216

(3) 連携研究者

なし