

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25286026

研究課題名(和文) ナノドットの一次元コヒーレント結合構造を用いたレアメタルフリー高性能熱電材料開発

研究課題名(英文) Development of coherently-connected nanodot structure for rare-metal-free thermoelectric materials

研究代表者

中村 芳明 (Nakamura, Yoshiaki)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：60345105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来関連のある熱伝導率と電気伝導率の同時制御は困難であるが、熱電変換において、高い電気伝導率と低い熱伝導率の実現は必要である。本研究では、ナノドット/Si層をコヒーレントに積層した構造を創出し、高電気伝導率、低熱伝導率をもつ材料の創製を行った。本ナノドットは、フォノンを波動として効率的に散乱し熱伝導率を低減する役割を果たしている。また、適切にドーピングすることでナノドット/Si界面では、あまり電子は散乱されない条件としている。そのため、高電気伝導率、低熱伝導率となるSi材料を開発することに成功した。これは、高性能Si系熱電材料実現の可能性を示す結果である。

研究成果の概要(英文)：The simultaneous control of the thermal conductivity and electrical conductivity has been difficult because of their correlation. However, this control is required for the development of the high performance thermoelectric materials. In this study, we developed the coherent nanostructures by stacking of epitaxial nanodots/Si layers, which can exhibit low thermal conductivity and high electrical conductivity. In the developed structures, nanodots played a role of the scattering bodies of phonon wave, leading to the drastic thermal conductivity reduction. On the other hand, by proper doping, the structures showed the bulk-like high electric mobility because nanodot interfaces do not prevent electron transport so much. As a result, we succeeded in the development of the Si-based nanostructures with high electrical conductivity and low thermal conductivity, bringing out the possibility of the realization of high performance Si-based thermoelectric materials.

研究分野：ナノ構造物理

キーワード：ナノ材料・創製プロセス シリコン

1. 研究開始当初の背景

(1) デジタル機器が普及した現代社会では、サーバーや PC 等から莫大なエネルギーが熱として無駄に失われている。この熱を電気エネルギーとして再利用することを目的とした高性能熱電材料の開発は、エネルギー・環境問題の観点から注目を浴びている。熱電変換の無次元性能指数、 ZT は、ゼーベック係数 S 、電気伝導率 σ 、絶対温度 T 、熱伝導率 κ を用いて、 $S^2 T / \kappa$ として表されるため、 S の値が大きく、 κ の値が小さい材料の開発が求められる。しかし、元素戦略的に有利なシリサイドなどのレアメタルフリーの熱電材料は、熱電性能が低い。このような状況下で、近年、ナノ構造の導入により、 ZT が向上することがわかってきた。多くの場合、界面面積増大に伴うフォノン散乱の促進により、熱伝導率が低減することに起因したものである。しかし、この効果を用いても、十分に高い ZT を有するレアメタルフリー熱電ナノ材料は得られていない。一方、量子効果が発現する低次元ナノ構造には、その高い電子状態密度のため、パワーファクター S^2 が向上するという理論的な予想が報告されている。もしナノ構造と電子状態を制御してパワーファクターの向上が実際に可能となれば、ナノ構造特有の熱伝導率低減効果と合わせることで、レアメタルフリー高性能熱電材料の実現が現実味を帯びてくる。

(2) 研究代表者は、独自のナノドット形成技術を用いて、熱伝導率を操作してきた。もし、この技術を用いて、コヒーレントにナノドットを結合したナノ構造を作製し、コヒーレントな電子波動状態の創出、フォノンの選択的散乱をナノ材料中に誘起することができれば、“高電気伝導率化”及び“熱伝導率低減”、という一般的には、同時に成り立たない現象の実現が期待できる。そこで、本研究では、既存の Si プロセス技術が利用可能な Si 基板上に、IV 族系半導体ナノドットのコヒーレント結合構造を形成し、コヒーレントな電子状態形成と選択的フォノン散乱を実現することで、高性能化したレアメタルフリー環境調和型熱電材料の開発を狙う。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、ナノドットをコヒーレントに結合した構造を創出し、背景で述べたように、高電気伝導率、低熱伝導率材料の創製を狙うことである。ナノドットの一次元連結構造が、電気伝導という意味では最適であるが、コヒーレント結合が研究のポイントであるため、一次元にこだわらず、ナノドットをコヒーレントに積層した種々の構造に注目し、熱電特性向上を狙う。具体的には、Si ナノドット/Si 層積層構造、Ge ナノドット/Si 層積層構造の形成を行い、適切にドーピングを行うことで、熱伝導率低減に加え、出力因子の増大を実現するナノ構造の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) コヒーレント結合したナノドット積層構造の形成が本研究の核となる。そこで、まず、研究代表者独自の極薄 Si 酸化膜技術を応用することで、環境調和型半導体である Si あるいは Ge ナノドットのコヒーレント結合した構造の作製を目指して、ナノドット/Si 層の積層化を行う(図1)。

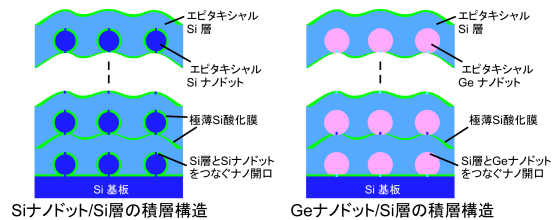


図1 独自ナノドット形成技術を用いたコヒーレントナノドット連結構造

(2) 次に電気特性を測定するために、ドーピングを行う。ナノ構造成長中にドーパントを導入する手法と、ノンドーブのナノ構造を形成後、イオン注入でドーピングを行う方法の二つを行う。成長中ドーピングは図2に示すようなプロセスで行い、この Ga-ドーブ固相エピタキシャル成長 (SPE) /Si ナノドットを形成する。このプロセスを繰り返すことで積層化する。

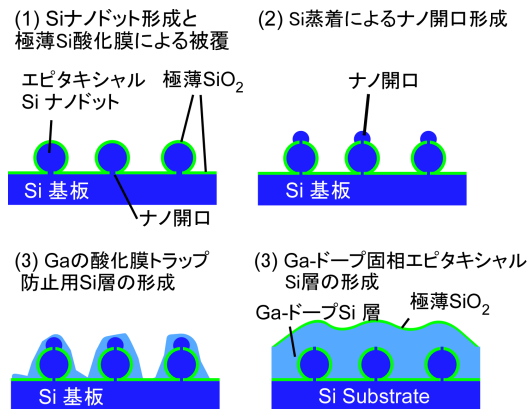


図2 Si ナノドット/Si 層への Ga の固相エピタキシャル成長プロセス

(3) 熱電特性評価を行う。これらの結果をフィードバックして、高性能な熱電特性を示すナノ構造を形成し、本研究提案の概念に基づいた熱電性能向上を実証する。

4. 研究成果

極薄 Si 酸化膜技術を用いて形成した Si ナノドット上への Ga ドープした Si 層をエピタキシャル成長するために Ga ドープ SPE-Si 層の形成を試みた。その際、Ga の表面偏析をなるべく防ぐために Ga をデルタドーピングした後に、Si を SPE 成長した。Ga は熱拡散により Si 層へドーブされるのを狙った。しかし、ドーピングの活性化率は低く、電気伝導

率が $1.1 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 以下と低いものであった。そこで、SPE - Si 層へのドーピングを Ga, Si の逐次蒸着ではなく、同時蒸着法で行うことにした。

その結果作成した Ga-ドーピング SPE-Si 層の反射高速電子線回折 (RHEED) 図形を図 3 に示す。ナノドットの上に形成しているので、ラフネスがあるもののエピタキシャル成長していることがわかる。

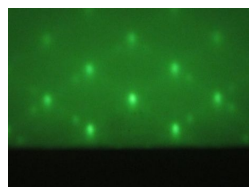


図 3 Ga-ドーピング SPE-Si 層の RHEED 図形

この試料の電気伝導率は、 $13.3 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ とドーピングに成功したことがわかる。次に、この技術を用いてドーピング SPE-Si 層/Si ナノドットを積層した試料を形成した。積層してもエピタキシャル成長することを確認し、電気伝導を測定した結果、 $2.4 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ であった。次にこの試料の熱伝導率を 2 法で測定した。その結果は、一層の Si ナノドット/Ga-ドーピング SPE-Si 層の場合 $\sim 3 \text{ W/mK}$ 、三層積層した場合、 $\sim 1 \text{ W/mK}$ であった。この異常な熱伝導率の低減は、ナノドットの存在や、ドーピングによる不純物の効果だけでは説明できない。本構造では、活性化率が低いことから Ga が界面 (極薄 Si 酸化膜など) に偏析していると予想され、その偏析したナノ構造が、フォノン散乱をさらに促進しているものと推察できる。

しかし、Ga の偏析のため、ドーピングと大幅な熱伝導率低減には成功したものの、それほど、電気伝導率を向上させることはできないことがわかった。

そこで、次に極薄 Si 酸化膜技術を用いた Ge ナノドットと Si 層のエピタキシャルな積層化を行った。このコヒーレントナノドット結合構造にイオン注入によりドーピングを行った。

Ge ナノドット/Si 層の積層構造 (8 回積層) の RHEED 図形を図 4 に示す。

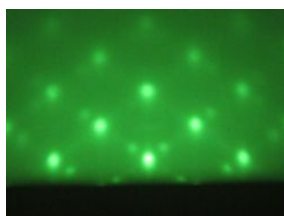


図 4 Ge ナノドット/Si 層の積層構造 (8 回積層後の Si 層) の RHEED 図形

RHEED 図形より、積層欠陥による双晶を示すピークが見られるが、積層してもエピタキシャル成長していることがわかる。

次に、Si 層の層厚、及び Ge ナノドットのサイズが異なるいくつかの Ge ナノドット/Si 層

積層構造に対して、イオン注入ドーピングを行い、電子移動度を測定した結果を図 5 に示す。電子移動度のキャリア濃度依存性は、いずれの Ge ナノドット/Si 層積層構造においても、バルク Si と同等であり、Si 基板上に形成したエピタキシャル Si 薄膜と同じ値を示した。本結果は、エピタキシャル Ge ナノドットを Si に導入した後も電気伝導率の低減がそれほど生じないことがわかる。また、成長中のドーピングの場合とは異なり、一回のイオン注入により、薄膜構造にキャリア濃度 $3 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 程度の高ドーピングが可能になった。

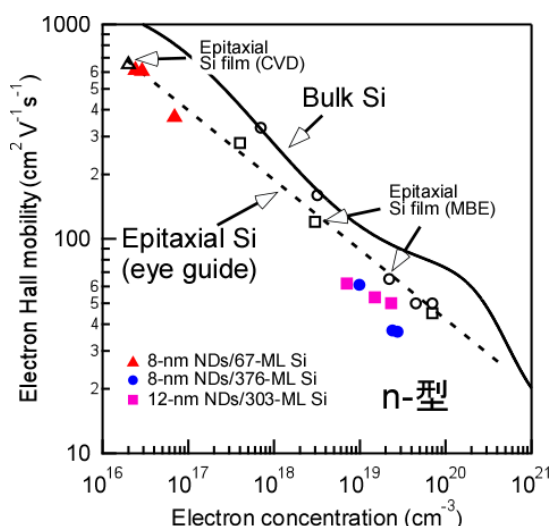


図 5 イオン注入した Ge ナノドット/Si 層積層構造の電子移動度 (Hall 移動度)

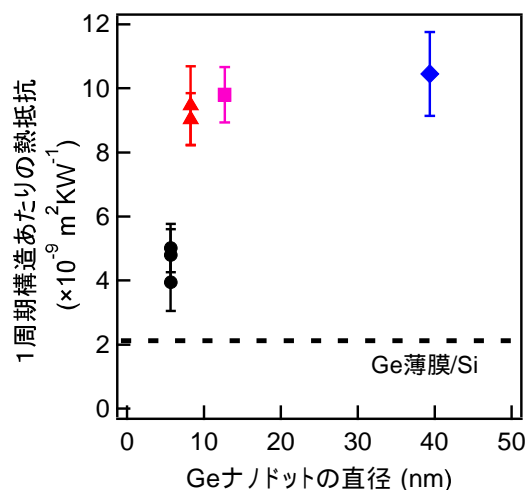


図 6 1 周期構造あたりの熱抵抗

この試料 (ノンドープ) の熱伝導率を測定すると、Ge ナノドットサイズに依存して、 $1\text{-}5 \text{ W/mK}$ 程度まで熱伝導率が低減した。この劇的な熱伝導率の低減の機構を調べるために、この全構造の熱抵抗を構造周期数で割ることにより、1 周期構造あたりの熱抵抗をもとめた。この値は、ナノドットサイズが大きくなるにつれて単調増加することがわかった。これは、ある媒質中に存在する粒子に波動が散

乱される際の散乱確率の傾向と似ている(光のアナロジーでいうレイリー散乱・ミー散乱)。散乱確率と熱抵抗のナノドットサイズ依存性が同様の振る舞いをするにより、この熱伝導率低減は、ナノ粒子によるフォノン波動の散乱によって生じていると推察することができる。

したがって、ナノドットをコヒーレントに結合した試料にドーピングを行うと、電気伝導率(電子移動度)は、Siの高い値が維持され、熱伝導率は、ナノ粒子によるフォノンの波動的散乱によって劇的に減少することがわかった。これは、ある程度の電気と熱の同時制御の成功を意味し、出力因子増大の新しい方法論になり得ることを意味する。

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16件)

T. Taniguchi, S. Sakane, S. Aoki, R. Okuhata, T. Ishibe, K. Watanabe, T. Suzuki, T. Fujita, K. Sawano, and Y. Nakamura, Thermoelectric Properties of epitaxial -FeSi_2 thin films/Si(111) and enhancement approach of its thermoelectric performance, J. Electron. Mater., 査読有、46, 2017, pp. 3235-3241

DOI: 10.1007/s11664-016-4997-0

K. Watanabe, T. Taniguchi, S. Sakane, S. Aoki, T. Suzuki, T. Fujita, and Y. Nakamura, Thermoelectric properties of epitaxial -FeSi_2 thin films grown on Si(111) substrates with various film qualities, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 56, 2017, pp. 05DC04-1-5

DOI: 10.7567/JJAP.56.05DC04

A. Ishida, Hoang Thi Xuan Thao, M. Shibata, S. Nakashima, H. Tatsuoka, H. Yamamoto, Y. Kinoshita, M. Ishikiriya, and Y. Nakamura, Amorphous / epitaxial superlattice for thermoelectric application, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 55, 2016, pp. 081201-1-5

DOI: 10.7567/JJAP.55.081201

T. Ishibe, H. Matsui, K. Watanabe, S. Takeuchi, A. Sakai, and Y. Nakamura, Epitaxial iron oxide nanocrystals with memory function grown on Si substrates, Applied Physics EXPRESS, 査読有, 9, 2016, pp. 055508-1-4

DOI: 10.7567/APEX.9.055508

S. Yamasaka, K. Watanabe, S. Sakane, S. Takeuchi, A. Sakai, K. Sawano, and Y. Nakamura, Independent control of electrical and heat conduction by nanostructure designing for Si-based thermoelectric materials, Sci. Rep.,

査読有, 6, 2016, pp. 22838-1-8

DOI: 10.1038/srep22838

T. Ueda, S. Sakane, T. Ishibe, K. Watanabe, S. Takeuchi, A. Sakai, and Y. Nakamura, Fabrication of Carrier-Doped Si Nanoarchitecture for Thermoelectric Material by Ultrathin SiO_2 Film Technique, J. Electron. Mater., 査読有, 45, 2016, pp. 1914-1920

DOI: 10.1007/s11664-015-4294-3

S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi & A. Sakai, Phonon transport control by nanoarchitecture including epitaxial Ge nanodots for Si-based thermoelectric materials, Sci. Rep., 査読有, 5, 2015, pp. 14490-1-9

DOI: 10.1038/srep14490

Y. Nakamura and M. Ichikawa, Formation of epitaxial nanodots on Si substrates with controlled interfaces and their application, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 54, 2015, pp. 07JD01-1-8

DOI: 10.7567/JJAP.54.07JD01

S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, S. Arai, T. Tanji, N. Tanaka and A. Sakai, Fabrication of Si thermoelectric nanomaterials containing ultrasmall epitaxial Ge nanodots with an ultrahigh density, J. Electron. Mater., 査読有, 44, 2015, pp. 2015-2020

DOI: 10.1007/s11664-015-3643-6

Y. Nakamura, M. Isogawa, T. Ueda, S. Yamasaka, H. Matsui, J. Kikkawa, S. Ikeuchi, T. Oyake, T. Hori, J. Shiomi, A. Sakai, Anomalous reduction of thermal conductivity in coherent nanocrystal architecture for silicon thermoelectric material, Nano Energy, 査読有, 12, 2015, pp. 845-851

DOI: 10.1016/j.nanoen.2014.11.029

K. Tanaka, Y. Nakamura, S. Yamasaka, J. Kikkawa, T. Sakai, A. Sakai, Formation and optical properties of Ge films grown on Si(111) substrates using nanocontact epitaxy, Appl. Surf. Sci., 査読有, 325, 2015, pp. 170-174

DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.11.033

M. Shimonaka, Y. Nakamura, J. Kikkawa, and A. Sakai, Self-assembly of Ge clusters on highly oriented pyrolytic graphite surfaces, Surf. Sci., 査読有, 628, 2014, pp. 82-85

DOI: 10.1016/j.susc.2014.05.018

W. Ikeda, Y. Nakamura, S. Okamoto, S. Takeuchi, J. Kikkawa, M. Ichikawa, and A. Sakai, Characterization of Ge films

on Si(001) substrates grown by nanocontact epitaxy, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 52, 2013, 095503-1-4
H. Hamanaka, Y. Nakamura, T. Ishibe, J. Kikkawa, and A. Sakai, Influence of nanometer-sized interface on reaction of iron nanocrystals epitaxially grown on silicon substrates with oxygen gas, J. Appl. Phys., 査読有, 114, 2013, pp.114309-1-5

DOI: 10.7567/JJAP.52.095503

Y. Nakamura, R. Sugimoto, T. Ishibe, H. Matsui, J. Kikkawa, and A. Sakai, Control of epitaxial growth of Fe-based nanocrystals on Si substrates using well-controlled nanometer-sized interface, J. Appl. Phys, 査読有, 115, 2014, pp.044301-1-5

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4862642>

S. Amari, Y. Nakamura, and M. Ichikawa, Luminescence properties of Si-capped beta-FeSi₂ nanodots epitaxially grown on Si(001) and (111) substrates, J. Appl. Phys., 査読有, 115, 2014, pp.084306-1-5

DOI:10.1063/1.4867037

[学会発表](計 63 件)

中村芳明, ナノ構造を用いた熱電特性制御と Si 系熱電材料開発, 日本金属学会時限研究会 第四回エレクトロニクス薄膜材料研究会 (**招待講演**), 2016 年 9 月 22 日, 大阪大学(大阪府豊中市)

坂根駿也, 谷口達彦, 渡辺健太郎, 中村芳明 Si 基板上への鉄シリサイド薄膜構造形成とその熱電物性, 第 28 回シリサイド系半導体と関連物質研究会 (**招待講演**), 2016 年 9 月 16 日, 新潟駅前カルチャーセンター(新潟県新潟市)

谷口達彦, 宮本拓, 奥畑亮, 渡辺健太郎, 中村芳明, Si(001)基板上エピタキシャル Ge 薄膜の熱電特性, 2017 年春季<第 64 回>応用物理学会, 2017 年 3 月 14-17 日パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

Y. Nakamura, Nanoarchitecture design for independent control of carrier and phonon transports, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings & Interfaces (Parcsurf2016)(**招待講演**), Dec11-15 2016, Kohala Coast, (アメリカ・ハワイ)

K. Watanabe, S. Yamasaka, T. Ishibe, S. Sakane, K. Sawano, and Y. Nakamura, Independent control of phonon and electron transport in Si-based nanoarchitectures with epitaxial Ge nanodots, The 1st Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS 2017), March 26-30, 2017, Jeju Island, Korea(韓国・

済州)

K. Watanabe, S. Yamasaka, S. Sakane, K. Sawano, and Y. Nakamura, Independent control of phonon and electron transport in Si films including epitaxial Ge nanodots, The 35th International Conference & The 1st Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2016)', May 29-June 2, 2016, Wuhan, P. R. China

T. Taniguchi, S. Sakane, S. Aoki, K. Watanabe, T. Suzuki, T. Fujita, and Y. Nakamura Thermoelectric properties of epitaxial -FeSi₂ thin films/Si(111), The 35th International Conference & The 1st Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT2016)', May 29-June 2, 2016, Wuhan, P. R. China

S. Sakane, K. Watanabe, M. Isogawa, S. Takeuchi, A. Sakai and Y. Nakamura Observation of covering epitaxial -FeSi₂ nanodots with Si for fabricating Si/ -FeSi₂ nanodots stacked structures, 23rd International Colloquium on Scanning Probe Microscopy, December 10-12 2015, Hilton Niseko Village, (北海道・ニセコ町)

Y. Nakamura, T. Ueda, M. Isogawa, S. Yamasaka, S. Takeuchi, and A. Sakai, Thermal conductivity reduction and carrier doping in the Si nanoarchitecture including epitaxial nanodots, '34th Annual International Conference on Thermoelectrics & 13th European Conference on Termoelectrics (ICT&ECT2015)', June 28-July 2, 2015, International Congress Center, Dresden, Germany

S. Yamasaka, Y. Nakamura, S. Takeuchi, and A. Sakai, Phonon scattering control by structure of epitaxial Ge nanodots in Si, '34th Annual International Conference on Thermoelectrics & 13th European Conference on Termoelectrics (ICT&ECT2015)', June 28-July 2, 2015, International Congress Center, Dresden, Germany

Y. Nakamura, Thermal conductivity reduction in the Si nanoarchitecture including epitaxial nanodots, IUMRS-ICAM2015 (**招待講演**), October 29th, 2015, ICC Jeju, Korea

中村芳明, ナノドットを用いた熱伝導率の低減と Si 系熱電材料開発, コロイド先端技術講座 II: 4th E-Colloid 先端エレクトロニクスのためのコロイド・界面化学次世代サーマルマネジメント技術が地球を救うーコロイド・界面化学・ソフ

トマターの欠かせない役割ー、平成 27 年 12 月 4 日、日本化学会館 7F ホール(東京都千代田区)(招待講演)

Y. Nakamura and A. Sakai, Epitaxial Growth of Nanodots on Si Substrates with Controlled Interfaces and Their Application to Electronics and Thermoelectronics, Electrochemical Society 226th meeting (招待講演), October 7, 2014).Cancun, Mexico

中村芳明、極薄 Si 酸化膜技術を用いた Si 系熱電ナノ材料の開発、電子情報通信学会研究会(SDM、ED)「機能ナノデバイスおよび関連技術(招待講演)、2015 年 2 月 5 日、北海道大学(百年記念会館)(北海道・札幌市)

中村芳明、エピタキシャル Si ナノドットを用いた熱伝導率の低減と熱電材料への応用、第 51 回日本伝熱シンポジウム(招待講演)、2014 年 5 月 22 日、アクトシティ浜松・コンgresセンター(静岡県浜松市)

Y. Nakamura, M. Isogawa, T. Ueda, J. Kikkawa, and A. Sakai, Stacking structures of epitaxial Si nanodots and their thermal conductivity, International Conference on Thermoelectrics -ICT2014, July 6-10, 2014, Nashville, Tennessee, USA

S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi, and A. Sakai, Thermal and electrical properties of Si films including epitaxial Ge nanodot phonon-scatterers, International Conference on Thermoelectrics - ICT2014, July 6-10, 2014, Nashville, Tennessee, USA

Y. Nakamura, M. Isogawa, S. Yamasaka, S. Tsurusaki, S. Takeuchi, A. Sakai, Epitaxial Growth and Thermoelectric Properties of Stacking Structures of Iron Scilicide Nanodots/Si, Material research society Fall meeting 2014, December 5, 2014, Boston, USA

- ②① 中村芳明、ナノドットを用いた Si 系熱電材料の開発、CREST・さきがけ元素戦略領域合同 第 1 回公開シンポジウム(招待講演)、2013 年 11 月 29 日、東京国際フォーラム(東京都・千代田区)

- ②② 中村芳明、ナノドットを用いた Si 系熱電材料の開発、第 22 回シリサイド系半導体研究会(招待講演)、2013 年 9 月 21 日、京都大学(京都府・京都市)

- ②③ Y. Nakamura and Akira Sakai, Anomalous reduction of thermal conductivity of stacked epitaxial Si nanodots structures, 1st Kansai NanoScience and Nanotechnology International Symposium(招待講演), February 4th 2014, Osaka, Japan

- ②⑥ S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi and A. Sakai, Reduction effect of thermal conductivity by introduction of epitaxial Ge nanodots in Si, ACSIN-12 & ICSPM21, November 5, 2013, Tsukuba International Congress Center, Ibaragi, Japan

- ②⑦ T. Ishibe, Y. Nakamura, H. Matsui, S. Takeuchi and A. Sakai, Epitaxial growth of Iron oxide nanodots on Si substrate and their electronic states, ACSIN-12 & ICSPM21, November 5, 2013, Tsukuba International Congress Center, Ibaragi, Japan

- ②⑧ M. Isogawa, Y. Nakamura, J. Kikkawa, S. Takeuchi and A. Sakai, Epitaxial growth of stacked -FeSi₂ nanodots on Si substrates and their thermoelectric properties, APAC SILICIDE 2013, July 29, 2013, Tsukuba University, Tsukuba, Japan

- ②⑨ S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, S. Arai, T. Tanji, N. Tanaka, and A. Sakai, Introduction of Ge nanodots in Si films as phonon scatterers and the thermal conductivity reduction, The 32nd International Conference on Thermoelectrics(ICT2013), July 1st, 2013, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan

他 34 件

〔図書〕(計 1 件)

中村芳明、裳華房、シリサイド系半導体ナノ構造(3.7 節)、シリサイド系半導体の科学と技術 - 資源・環境時代の新しい半導体と関連物質 -、2014、23

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.adv.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 芳明 (NAKAMURA, Yoshiaki)
大阪大学・基礎工学研究科・教授
研究者番号：60345105

(2) 研究分担者

澤野 憲太郎 (SAWANO, Kentaro)
東京都市大学・工学部・教授
研究者番号：90409376