

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02777

研究課題名(和文) IV半導体ヘテロ界面へのドーパント低次元配列の形成

研究課題名(英文) 2D array of Dopant at the hetero interface of IV group semiconductors

研究代表者

三木 一司 (Kazushi, Miki)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号：30354335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：半導体では通常一部の元素を他元素と置換して電気伝導度の制御を行う。置換元素はドーパントと呼ばれ、電気伝導度制御以外にも多くの物性機能の開花を可能とする。本研究では、スピントロニクスを目的として、1次元や2次元の低次元の重金属元素ドーパント構造を形成することに成功した。特にSi表面にBiドーパントの1次元構造とMnドーパントの2次元構造を形成し放射光を用いたXAFS測定などにより異方性を持つ低次元構造を決定した。何れの重金属ドーパントの低次元構造は電気的特性評価からドーパントとしての働きを確認している。Ge/Si(001)界面に形成したMnドーパントの低次元ドーパ層は非線形の磁気抵抗を示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本結果は材料開発の一つのブレークスルーであり、ドーパントの低次元構造を用いた新たなデバイス新材料を模索する事が可能になる。期待できる機能材料は、(1)高い移動度を有するチャンネル1、(2)核スピンを使った量子コンピュータ(量子ビットの1次元構造体)2、(3)Digital Magnetic Alloyと呼ばれる磁性材料(ハーフメタル)などである。

研究成果の概要(英文)：In the field of semiconductor, doping is the intentional introduction of another element into an the semiconductor for the purpose of controlling its electric conductivity. Dopant can also modulate or generate other material functional properties. In this work, for the application into the spintronics, we succeeded in fabrication of low dimensional structures of heavy metal elements, Mn and Bi, dopants in silicon semiconductor. We buried Mn chains (1D structure) on Si(001) surface with Ge few monolayers, then analyzed it with using polarized XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) at SPring-8. It strongly suggested that Mn dopant has low dimensional structure. In the case of Bi dopant, we also buried the Bi nanolines in Si layers, then we analyzed with XAFS at SPring-8. The results show that 400 degree C is the critical temperature to electrically activate the Bi dopants in Si crystal.

研究分野：結晶工学

キーワード：シリコン ドーパント 重金属 低次元構造 放射光 局所構造解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

シリコン結晶は、これまでの微細加工技術とともに LSI の高速化、高密度化などで著しく発展を遂げている。また、ITRS ロードマップ 2008 年版では More than Moore の用語が「必ずしもムーアの法則に従わないがいろいろな機能をデバイスに盛り込むこと」と新たに定義され、多機能化によるシリコンデバイスの多様化を要請している。これらのためには、シリコン半導体をハード面でもソフト面でも機能化する必要があり、そのための革新技術が必要とされている。様々な技術の中から、本研究ではドーピング技術を取り上げる。その理由は、シリコン半導体では、ドーパントは軽元素の P、B、As のみが使われ、これら以外の元素は利用されていない事である。つまり、探索されていない重元素が持つ多様な機能発現性は未開拓である。

2. 研究の目的

前回の基盤 A の研究「次世代シリコンデバイス機能創出のためのドーパントの多様化」では、シリコン結晶中に Bi 元素と Mn 元素がドーピングできる事を見出した。両者は、シリコン表面で 1 次元構造を持つことが分かっている。この研究では、表面構造体をシリコン結晶中に埋め込み、アニール等のプロセスで構造体をばらばらに破壊して構成原子をシリコン結晶の原子置換位置に入れる事を想定していた。輸送特性評価からドーピングの成功は判明している。想定外であったのは、放射光を利用した X 線回折より Bi 1 次元構造体の 1 次元構造が壊れていない事が分かった事である。翻って考えれば、この結果は材料開発の一つのブレークスルーであり、ドーパントの低次元構造を用いた新たなデバイス新材料を模索する事が可能になる。期待できる機能材料は、(1) 高い移動度を有するチャンネル¹、

(2) 核スピンを使った量子コンピュータ(量子ビットの 1 次元構造体)²、(3) Digital Magnetic Alloy と呼ばれる磁性材料(ハーフメタル性)^{3,4} など、局在スピンの 1 次元や 2 次元配列である。

本研究では、Bi 及び Mn 元素の重元素ドーパント低次元配列を形成する結晶成長プロセスを研究し、放射光評価手法を利用して界面構造を決定し、輸送特性測定手法を利用して機能性を明らかにする。シリコン結晶は電子のスピン拡散長が長い⁵ など有利な点を持ちながら化合物半導体に^{6,7} 比べてスピントロニクス分野で劣勢である。本研究では、シリコン結晶でも優れたスピントロニクス実現に貢献する。

本研究では放射光を利用した局所構造評価を多用した。研究開始後に β 型酸化ガリウムがパワーエレクトロニクスの新材料として登場しドーパントの局所構造評価などの基盤知見が殆ど無いことを知り、シリコン結晶中のドーパントの局所構造解析と同じ手法を使えば β 型酸化ガリウムの研究にも貢献できるので、 β 型酸化ガリウムのドーパントの構造評価も行った。

引用文献 [1] T. Shinada et al., *Nature*, 437, 1128 (2005); [2] B. E. Kane *Nature* 393, 133 (1998); [3] M.C. Qian et al.; *Phys. Rev. Lett.* 96, 027211 (2006); [4] A. Stroppa et al.; *Phys. Rev. B* 68, 155203 (2003); [6] A. M. Nazmula et al.; *Appl. Phys. Lett.* 80, 17 (2002); [7] H. Ohno et al.; *Appl. Phys. Lett.* 69, 363 (1996); [5] I. Appelbaum et al.; *Nature* 447, 295-298 (2007).

3. 研究の方法

3. 1 試料作製手法

図 1 に示す様に、分子線エピタキシー装置内で、シリコン結晶表面に Bi あるいは Mn の 1 次元表面構造体を形成し、この表面構造体を結晶成長によりシリコン層に埋め込み、その後アニール処理を施し表面構造体の低次元構造を保持して構造を局所的に破壊し、重元素をシリコン結晶中の置換位置に配置させる。作製前の構造は走査型トンネル顕微鏡観察により、成長中の構造は高速反射型電子線回折 (RHEED) により調べた。

3. 2 評価手法

作製後の試料は、放射光施設 SPring-8、BL37XU にて EXAFS 測定を行った。Mn ドーパント低次元構造はシングルドメインの Ge/Si (001) 界面に埋め込んだ試料を測定した。Bi ドーパントの 1 次元構造の比較用の試料として Bi のイオン注入試料を量子情報科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所の 400keV イオン注入装置で作製し、放射光施設 SPring-8、BL39XU (アンジュレータ設置ライン) にて同試料の蛍光 X 線ホログラフィーの測定を行った。シリコン結晶中の Mn ドーパントの低次元構造は機能性探索のために電気的特性評価を行った。

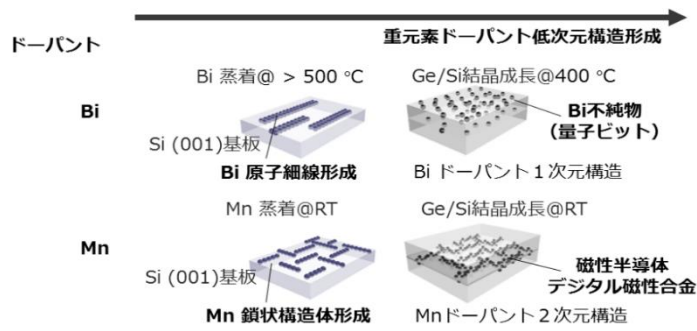


図 1 重金属ドーパント低次元配

4. 研究成果

4. 1 Bi ドーパント一次元構造

4. 1. 1 ドーパント埋め込みのサーファクタント技術⁴

Si (001) 表面には約 600°C で Bi が原子細線を形成する。埋め込み方法は 2 種類あり、室温へ降温してから Si 又は Ge 層を堆積して埋め込む方法と、約 400°C 程度へ降温して、Bi 層を 1ML 堆積後に Si のエピタキシャル成長を行う方法である。後者については 2 原子置換モデルを用いて結晶成長のカイネティックスの観点から解析を行った。図 2a にその概略を示す。この図では最表面層から 3 層目までが記載されており、1 層目原子と 2 層目原子はエネルギーバリアを越えての置換が可能である。エピタキシャル成長前の 1 層目（最表面）は全て Bi 原子、2 層目は Bi 細線の Bi 原子又は Si 原子になる。2 層目の Bi は 1/8ML である。図 2b にその具体的な置換を示しているが、(ii) に示すように、赤で示されている Bi 原子同士は置換が起きても同じ構造になる。我々はこういった特殊な surfactant を auto-surfactant と名付けた。Si のエピタキシャル成長が始まると、1 層目は徐々に Si 原子になっていき、図 2b の (i) に示すように、Si 原子と Bi 原子の置換が始まる。Si の成長レートは 0.03nm/s である。解析結果を図 3 に示す。図中の ■ □ ● ○ は 2 次イオン質量分析により判明している残留した Bi の量である。注目するのは約 340°C ■ 辺りの解析線で 2 層目のバリアーが 1.77eV に相当し、線が飽和に達する辺りになる。この事は Bi 原子細線がほぼ埋め込まれることを解析的にも確かめられた事になる。残留する量が Bi 原子細線の量そのものである事は、一次元構造を保持したままで埋め込まれたと解釈するのがもっとも素直である。Bi を auto-surfactant として使った際の 2 原子置換モデルの解析より、Bi のドーパントの一次元構造が実現している可能性が高いことが分かった。

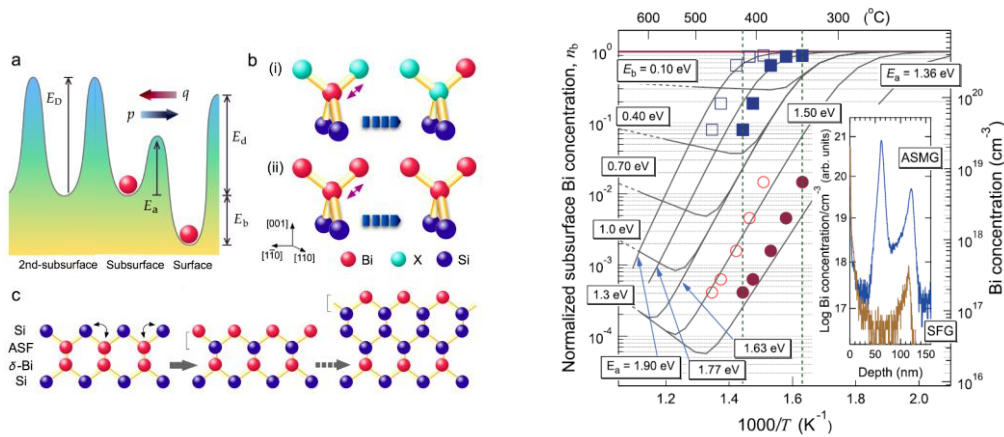


図 2 2 原子置換モデル⁴。

図 3 表面 2 層目に残留する Bi 濃度（規格値）の基板温度依存性⁴。

4. 1. 2 ドーパントの局所構造解析：局所構造解析からみた活性化⁵

Bi ドーパントが活性化する機構を局所構造解析から明らかにするために、1/8 ML の Bi 原子細線を 4.1.1 で記載した auto-surfactant を使って基板温度 400°C で Si 堆積層に埋め込んだ試料、室温で Si 堆積層に埋め込んだ試料を測定した。Bi の量が極微量な為、放射光を使った EXAFS 測定を行い、測定は蛍光 X 線収率法を用いた。2 つの試料の XAFS スペクトルは良く似ており（図 4）、フィッティングにより定量化（表 1）しないと差は出ない。結果是一件奇妙に思えるが、室温で Si 堆積をしてもかなりの Bi 原子細線構造が壊れて Bi 原子は Si の原子置換位置に入り、Bi 原子細線は約 25% だけ生き残る、400°C になると Bi 原子は 100% 原子置換位置に入る、とすれば説明可能である（図 5）。このモデル解析では Bi 原子細線の Bi-Si 結合距離を HAIKU モデル⁷ の値を使った。結合距離の理論値を信じて良いかどうかは光電子回折の実験データの解析から確かめた。また、Si 層を堆積した時に、Bi 細線が壊れて原子置換位置に入っていることは、過去取得した X 線定在波法による解析結果⁶ も説明できることから妥当な結論と考えている。局所構造解析からは約 400°C でのアニール又は結晶成長により原子置換位置に入る、つまりドーパントが電気的に活性化していると結論できる。

Samples	R (Å)	CN*	σ^2 (Å ²)	ΔE (eV)	R-factor
(A) Si cap at 400 °C	2.63 ± 0.02	4.4 ± 0.5	0.0081 ± 0.0021	-1.49	0.00084
(B) Si cap at RT	2.670 ± 0.003	0.9 ± 0.5	0.0041 ± 0.0003	-1.67	0.00007
(C) Bi ⁺ ion implanted	2.63 ± 0.01	1.1 ± 0.5	0.003 ± 0.001	0.47	0.00033
(D) Bi bulk (Bi-Bi bond)	3.075 ± 0.004	2.3 ± 0.5	0.0055 ± 0.0012	-	0.02918

表 1 Bi 1 次元構造を埋め込んだ試料の XAFS スペクトルの解析結果⁵

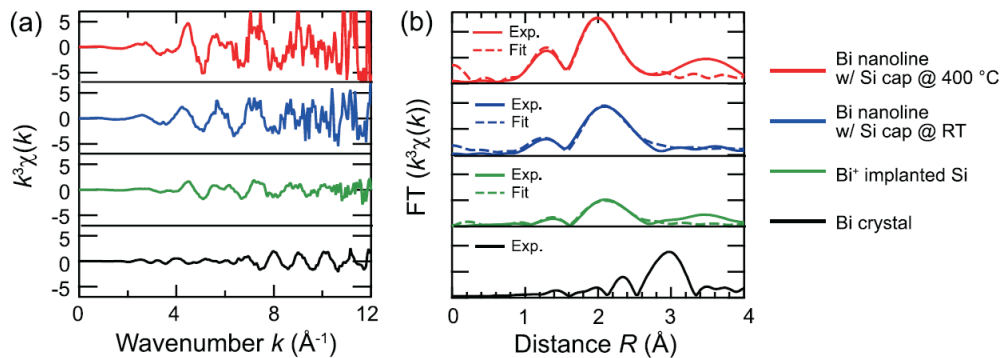


図4 Bi 1次元構造を埋め込んだ試料のXAFSスペクトルと動径分布関数⁵

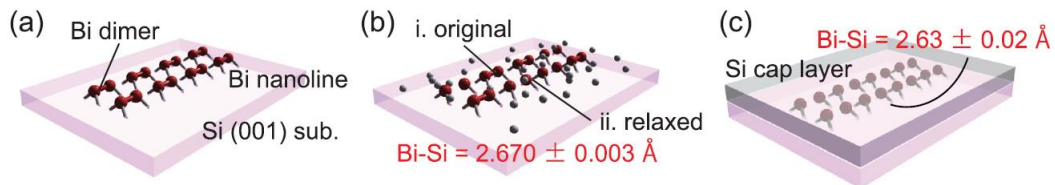


図5 Bi 1次元構造体の電気的活性化プロセスのモデル⁵

4. 1. 2 ドーパントの局所構造解析： 電気的特性評価⁸

Bi 原子一次元構造体を室温でSi 堆積層中に埋め込み、キャリア濃度のアニール温度依存性を調べた結果、Bi ドーパントの電気的活性化は400°Cのアニールで起きている事が分かった。更に温度を上げて行くと、700°Cでn型からp型になってしまい、Bi のn型としての電気的活性は消滅する。推測としてBi が空孔と複合体ができていて構造でp型になり得るので、イオン半径が大きなBi ドーパントがアニールによって複合体を形成するなどの変化が起こったと考えることができる。

4. 1. 3 総括

ここで述べたデータに加えて、4. 1. 2に相当する試料の低角X線解析で一次元構造を確かめてある⁹。局所構造解析と電気的特性評価の結果を纏めると、Bi ドーパントの1次元構造がSi 結晶中に実現できたと結論できる。

引用文献 [4] K. Murata et al., *Appl. Phys. Lett.* 111, 152104 (2017); [5] K. Murata et al., *J. Phys.: Condens. Matter* 29 (2017) 155001 (7pp); [6] A. Saito et al.; *Japanese Journal of Applied Physics. Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers.* 42, 2408-2411(2003); [7] J.H.G. Owen et al.; *Physical Review Letters* 88 (2002) 226104 (4 pages); [8] K. Murata et al., unpublished; [9] O. Sakata et al.; *Physical Review B* 72 (2005) 121407 (4 pages).

4. 2 Mn ドーパント一次元構造

4. 2. 1 ドーパントの局所構造解析： 局所構造の異方性

Mn ドーパントの低次元構造を明らかにするために、1/2 ML のMn 鎖構造をSi (001) 表面に形成した。Mn ドーパント低次元構造はシングルドメインのSi/Si (001) 界面及びGe/Si (001) 界面に埋め込み、この試料構造の工夫により構造解析がしやすくなっている。シングルドメイン構造により、Mn 一次元構造体の一次元構造方向と垂直方向の区別ができる(図6)。Ge/Si ヘテロ構造によりMn 低次元構造の基板との結合とヘテロエピ層との結合の区別が容易になる。Ge 層の堆積は室温で行った。昇温するとMn がSi と混晶を形成するためである。Mn が極微量な為、放射光を使ったEXAFS測定を行い、測定は蛍光X線収率法を用いた。XAFSの偏光依存性は1次元体と平行の偏光の場合にはあまり差が出ないが1次元体と垂直方向、z方向の偏光では差が出る。これは、1次元体と平行の偏光の場合にはMn原子とシリコン基板との結合で両者ともに基本的に同じ構造のためである。1次元体と平行の場合にはMn原子と上部堆積層との結合をみているため、相手がSiかGeで違いうために差が出る。z方向の依存性では両方の結合を含んでいるために差が出る。最終的にフィッティングを行った結果を図7及び表2に示す。

Shell	R (Å)	CN*	σ^2 (Å ²)
Mn-Si (out-of-plane)	2.37 ± 0.02	1.4 ± 1.3	0.001 ± 0.01
Mn-Ge (out-of-plane)	2.49 ± 0.03	1.1 ± 6.3	0.010 ± 0.06

表2 Ge/Si 界面にMn 1次元構造を埋め込んだ試料のXAFSスペクトルの解析結果¹⁰

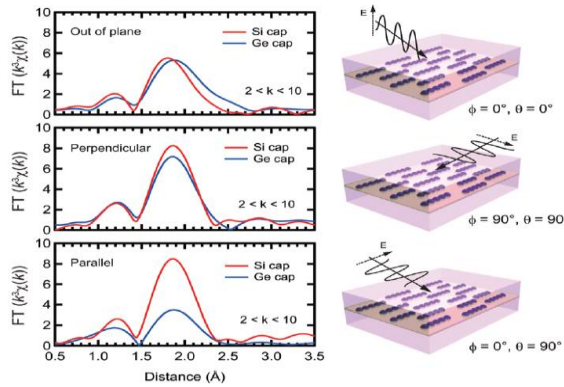


図6 蛍光 XAFS の偏光依存性¹⁰. Mn 1次元構造体に平行(b中)と垂直(b下)にX線を照射した場合、キャップ層がSiかGeで違いが出る。

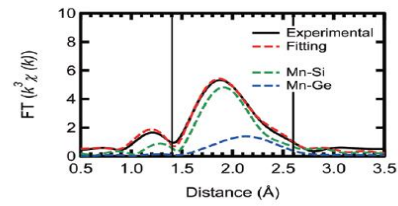


図7 z方向偏光の蛍光 XAFS のフィッティング結果¹⁰.

Mn 1次元構造体は 1/2ML の飽和量を Ge/Si 界面に埋め込んで、原子置換位置に入るとすると、Mn は Si (001) 結晶面にユニットセル一つ置きに入ることになる。従って、一方向は 2×周期に Mn 1次元構造が並ぶと、結果的には 2次元構造になると考えられる。表 2 の結果を基にして可能な構造を図 8 に示す。元になる Si (001) 表面上の Mn 鎖状構造 (1次元構造) が未解明のため、2つの構造が残る。図 8 b, c は DFT 計算でエネルギー的にも低い構造になっている。

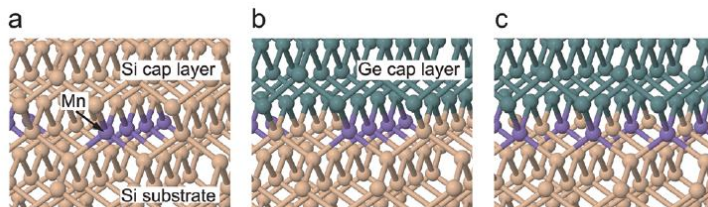


図8 Si/Si(001)界面 (a), 及び Ge/Si(001)界面(b,c)の Mn ドーパントの 2次元構造モデル¹⁰.

4. 2. 2 電気的特性評価：局所構造の異方性

Ge/Si (001) 界面の Mn δ ドープ層 (Mn ドーパント低次元構造) の電気的特性評価の結果を図 9 に示す。磁気抵抗の温度依存性を測定すると約 120K 辺りで異常を示す (図 9 a)。ホールで電圧を 120K 周辺で調べると磁気抵抗は直線的な振る舞い (オーミック特性) 以外に 2次曲線成分を持つ (図 9 b)。面内及び面に垂直方向で、磁場抵抗の外部磁場依存性を調べると、特に後者は負の 2次特性を持つことが明らかになった (図 9 c, d)。

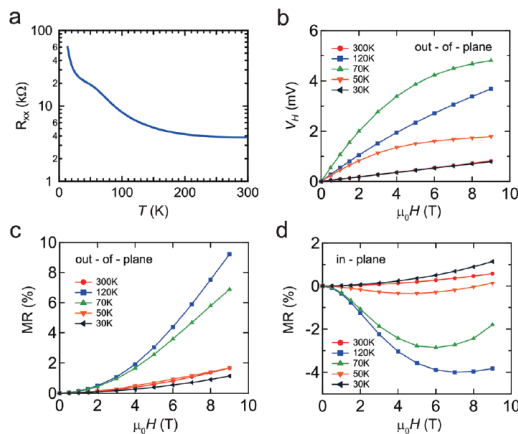


図9 Ge/Si 界面に形成した Mn ドーパント δ ドープ層の輸送特性¹⁰. 磁気抵抗の温度依存性(a)、ホール電圧の外部磁場依存性(b)、面内及び面に垂直方向の磁気抵抗(c, d).

4. 2. 3 総括

局所構造の偏光依存性から Mn ドーパントは異方性を持つことが分かり低次元構造を持つ可能性が高い。また電気的特性評価の結果を纏めると、Mn はドーパントとして働いていて、磁気抵抗などの物性機能を持つ Mn ドーパントの低次元構造が Ge/Si (001) 結晶中に実現できたと結論できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Koichi Murata, Christopher Kirkham, Masaru Shimomura, Kiyofumi Nitta, Tomoya Uruga, Yasuko Terada, Koh-ichi Nittoh, David R Bowler, Kazushi Miki	4. 巻 29
2. 論文標題 Dopant activation mechanism of Bi wire- -doping into Si crystal, investigated with wavelength dispersive fluorescence x-ray absorption fine structure and density functional theory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter	6. 最初と最後の頁 155001 ~ 155001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aa6180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murata Koichi, Miki Kazushi, Fukatsu Susumu	4. 巻 111
2. 論文標題 Autosurfactant of the second kind: Bi enables -doping of Bi in Si	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 152104 ~ 152104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5001154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murata Koichi, Kirkham Christopher, Tsubomatsu Satoshi, Kanazawa Takashi, Nitta Kiyofumi, Terada Yasuko, Uruga Tomoya, Nittoh Koh-ichi, Bowler David R., Miki Kazushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Atomic layer doping of Mn magnetic impurities from surface chains at a Ge/Si hetero-interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 295 ~ 301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/c7nr07177a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Miki, N. Happo, K. Kimura, K. Sasaki, Y. Tang, K. Nawata, H. Kitafuji, S. Kitamura, H. Ozaki, K. Hisatsune, R. Yamaguchi, H. Tajiri, S. Yamakoshi, K. Hayashi, A. Kuramata
2. 発表標題 Fluorescence X-ray Holography of Sn from Sn: -Ga2O3 widegap oxide semiconductor.
3. 学会等名 Symposium on 3D Active-site Science in London-3D Atomic-imaging Technologies from Material to Biology-
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Miki
2. 発表標題 Two-step ultrasonication method to make 2D arraying of midnanometer-sized (10-100 nm) gold particles
3. 学会等名 Symposium on Surface and Nano Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Miki, Koichi Murata, Christopher Kirkham, Masaru Shimomura, Kiyofumi Nitta, Tomoya Uruga, Yasuko Terada, Koh-ichi Nittoh, David R Bowler
2. 発表標題 Dopant activation mechanism of Bi wire-doping into Si crystal
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三木 一司、八方 直久、木村 耕治、佐々木 公平、唐 佳藝、縄田 皓太郎、北藤 滉、北村 真也、尾崎 ひかる、久常 健太郎、山口 亮太、田尻 寛男、山腰 茂伸、林 好一、倉又 朗人
2. 発表標題 Sn: 型酸化ガリウムのドーパント局所構造
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中和幸, 星健夫, 一宮彪彦, 望月出海, 三木一司, 兵頭俊夫, 福島孝治
2. 発表標題 高速化データ駆動科学としての陽電子回折
3. 学会等名 ポスト「京」重点課題(7)「次世代の産業を支える新機能デバイス・高性能材料の創成(CDMSI)」第4回シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中和幸、星健夫、一宮彪彦、望月出海、三木一司、兵頭俊夫
2. 発表標題 陽電子回折実験向け解析ソフトウェアの高度化
3. 学会等名 物理学会2018年秋季大会（物性）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本 達也、和泉 遼、松本 克春、内藤 賀公、李 艶君、菅原 康弘、三木 一司
2. 発表標題 原子間力顕微鏡によるSi(110)-(16x2)再構成表面の観察
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三木 一司、河裾 厚男、前川 雅樹、田尻 寛男、八方 直久、Ang Artoni Kevin Roquero、林 好一
2. 発表標題 Si結晶中へのBiのイオン注入ドーピング
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kirill Bulgarevich、坂本謙二、三成剛生、安田剛、三木一司、竹内正之
2. 発表標題 Very High Electrical Stability of Bottom-Gate/Top-Contact Type Polymer-Based Organic Field-Effect Transistors with Perfluoropolymer-Coated Gate Dielectrics
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazushi Miki
2. 発表標題 Formation of Uniform and High-Coverage Monolayer Films of 2 Dimetional Midnanometer-Sized Gold Particles over the Entire Surfaces of 1.5-in. Substrates
3. 学会等名 平成30年度大阪大学国際合同会議「次世代機能性材料・表面/界面物性の解明と機能探索の動向」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Murata, K. Miki, C. Kirkham, S. Tsubomatsu, T. Kanazawa, K. Nitta, Y. Terada, T. Uruga, K. Nittoh and D.R. Bowler
2. 発表標題 Doping of wired-Mn magnetic impurities at Ge/Si interface
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 A. Ogawa, H. Tanaka, S. Ohno, M. Tanaka, K. Miki, S. Ogawa, Y. Takakuwa
2. 発表標題 Mechanism of initial thermal oxidation on Si(113) surfaces
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三木一司
2. 発表標題 Introduction of wired-heavy metal dopants into Si substrates
3. 学会等名 応用物理学会関西支部セミナー「機能性材料・デバイス解析の最前線」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三木一司
2. 発表標題 新しい手法を使った、シリコン半導体ドーピングと評価
3. 学会等名 半導体新規化学プロセス研究会第一回例会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	唐 佳芸 (Tang JiaYi) (70785287)	兵庫県立大学・工学研究科・助教 (24506)	
研究分担者	坂本 謙二 (Sakamoto Kenji) (00222000)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員 (82108)	