

令和元年6月17日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17704

研究課題名(和文) 超音波によるシリコン原子空孔がもつ四極子歪み結合の解明

研究課題名(英文) Ultrasonic study of quadrupole-strain coupling of silicon vacancy

研究代表者

三本 啓輔 (MITSUMOTO, Keisuke)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：50515567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：半導体産業で用いられるシリコン中の原子空孔は希薄に存在し、原子空孔の電子状態は立方対称性をもつ。超音波計測により弾性定数の低温ソフト化の圧力依存性を調べることで、原子空孔の量子状態がもつ電気四極子と超音波歪みが相互作用する機構を明らかにした。また、原子空孔濃度が臨界濃度を超えると四極子歪み結合の発達により低対称に歪むことが示唆され、これは従来の電子スピン共鳴実験による結果と一致する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコン原子空孔の観測とその電子状態の解明は、基礎研究のみならず産業応用も期待される重要な課題である。シリコン原子空孔軌道はCe化合物の電子状態と類似しているため、本研究は強相関物理において普遍性もち、多極子が主役を演じる強相関物理の発展が期待される。さらに原子空孔濃度評価技術の開発が進むことでシリコンの結晶育成技術の発展につながり、超音波物理の研究成果が社会に還元されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Observation of vacancies in crystalline silicon and elucidation of its electronic state are important issues in terms of basic and applied researches. There are rare vacancies in the crystalline silicon currently used in semiconductor industry, and the electronic state of the vacancy has cubic symmetry. We elucidated a mechanism for coupling electric quadrupoles of the vacancy and ultrasonic strains by measuring of pressure dependence of the softening of elastic constant and analyzing them with electric quadrupole susceptibilities. When concentration of the vacancy is above a critical concentration, the vacancy deforms from cubic to lower symmetry due to development of the quadrupole-strain coupling. This is consistent with previous and famous studies of the electron spin resonance.

研究分野：物性物理学

キーワード：超音波物理 原子空孔 電気四極子 表面弾性波 強相関電子系

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

シリコンは半導体の基板材料に用いられ、ドーパントを添加し電子状態を制御することにより様々な用途のデバイスに利用されている。例えば、ホール添加に対応するボロン添加シリコンは情報処理などに用いられる半導体デバイスに利用され、ザインルールが 10 ナノレベルに到達しており、微細化に耐えうるウェーハの高品質性が求められている。他方、電子添加に対応するリン添加シリコンは電力変換などに用いられるパワー半導体に利用され、ウェーハ大口径化のための高品質性が求められている。各種デバイスの基板となるシリコンの特性向上には、結晶製造において生成されるボイド (COP: Crystal Originated Particle) や酸素析出物 (BMD: Bulk Micro Defect) の制御が必要である。点欠陥である原子空孔は、結晶中で多様な活性度をもつためこれらナノオーダー欠陥の生成を支配する因子である。しかし、半導体産業でのデバイス製造に用いられているシリコン中の原子空孔濃度は非常に小さく、その観測が困難であった。

2006 年に超音波計測によりシリコンの弾性定数が降温に伴い減少するソフト化が観測されたことにより、シリコン原子空孔の観測に初めて成功した[1]。その後、高品質ボロン添加シリコン結晶を用いた超音波研究が進み、シリコン原子空孔が示す物理が解明され始めた。超音波を用いて計測する結晶の固さを表す弾性定数は、通常、温度の降下に伴って増大する。ところが、結晶中に電気四極子をもつ電子やイオンの量子状態が存在すると、低温で弾性定数の減少 (ソフト化) が観測される。シリコン原子空孔の周りにいるシリコン原子のダングリングボンドの再結合とスピン軌道相互作用により、 $\Gamma_8$  四重項基底状態と  $\Gamma_7$  二重項励起状態で構成される原子空孔軌道の量子状態ができる。強相関物理の研究から、 $\Gamma_8$  四重項は電気四極子をもつことが分かっており、四極子歪み相互作用により弾性定数はソフト化を示す[2, 3]。また、赤外線トモグラフィを用いた原子空孔の凝集体であるボイドの観測と超音波による原子空孔の観測とを組み合わせることで、四極子歪み結合定数  $g$  のオーダーを決定した。弾性定数のソフト化を測定することで原子空孔濃度を評価する方法を構築した[4]。さらに、ウェーハ表層を伝搬する表面弾性波と原子空孔との結合機構を理論的に解明し、表面弾性波により測定したソフト化の大きさからウェーハ表層に存在する原子空孔濃度を知ることができるようになった[5]。これらのシリコン原子空孔を対象とした超音波物理の発展により、原子空孔軌道が示す量子状態の解明という基礎研究を行えるようになった。

### 2. 研究の目的

大きく広がった原子空孔軌道は巨大な電気四極子を持ち、極めて大きな四極子歪み結合を示すので、超音波計測による弾性定数の低温ソフト化により、希薄な濃度で存在する原子空孔を観測できる。希薄な原子空孔がソフト化に寄与する起源となる四極子歪み結合効果を詳細に解明することで、半導体デバイスの基板材料であるシリコンウェーハの原子空孔濃度を評価する全く新しい半導体技術の創成に寄与する。

#### (1) 歪み誘起による四極子歪み結合の詳細な決定

超音波と赤外線トモグラフィにより四極子歪み結合定数  $g$  のオーダーを  $10^5$  K と決定した[4]。これから求められる変形ポテンシャルの大きさは  $10^5$  K であり、シリコンの価電子バンドと同程度の大きさである。原子空孔濃度評価を行うためには  $g$  を高精度で求める必要がある。静水圧力下におけるシリコン中のバルク波の低温ソフト化を調べる。また短冊状に成形したシリコンウェーハ試料を極僅かに歪ませることで、原子空孔軌道の四重項基底を分裂させ、表面弾性波の低温ソフト化とその磁場依存性を測定する。低温ソフト化の歪み依存性と磁場依存性を四極子感受率による解析を進めることで、四極子歪み結合定数  $g$  を精密に決定し、ウェーハの原子空孔濃度を評価したいとの半導体産業からの要望に応える。

#### (2) 高濃度原子空孔による構造相転移

原子空孔濃度を増大させると、ソフト化が大きくなり、弾性定数がゼロとなる臨界濃度を越えると、原子空孔の周囲の格子は立方対称を保てずに低対称へ歪むことが予想される。このとき、電子スピン共鳴実験などにより明らかにされてきた従来の原子空孔物理に対応する[5]。これは、 $10^{16} / \text{cm}^3$  という高濃度に存在する原子空孔軌道間の歪み場を介した相互作用により、局所的に自発歪みが発生しているためと考えられる。これは磁性希釈系でのスピングラスと類似している。一方、半導体産業でのデバイス製造に用いられているシリコンウェーハの原子空孔濃度は、 $10^{12} / \text{cm}^3$  という極限的な希薄さに対応する。原子空孔軌道が原子空孔の周囲の格子と相互作用し歪む状況を原子空孔濃度依存性を考慮し原子空孔軌道の点群を調べることで解明する。

#### (3) リン添加シリコンのソフト化

ボロン添加シリコンが半導体デバイスに用いられる一方で、リン添加シリコンはパワー半導体に用いられ、省エネ社会のキー・テクノロジーである。エネルギー産業が急速に成長しているので、リン添加シリコン中の原子空孔評価も重要になっている。そこで、リン添加シリコンのソフト化を観測し、リン添加シリコンの場合の原子空孔軌道の量子状態を解明する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 歪み誘起による四極子歪み結合の詳細な決定

シリコン中の原子空孔軌道は、極めて巨大な四極子歪み結合定数を持っている。静水圧を印加すると、原子空孔軌道の歪みが  $\langle r^2 \rangle$  が変化することが考えられ、静水圧効果に対する四極子歪み相互作用  $g \langle r^2 \rangle$  や四極子相互作用  $g'$  の応答を観測することが期待される。そこで、ピストンシ

リング型の静水圧セルを用いて、ボロンドープ FZ シリコンの弾性定数  $C_{44}$  の測定を行う。また僅かな歪みで、原子空孔軌道の  $\Gamma_8$  四重項基底は 2 つのクラマス二重項に分裂することが考えられる。低温でのソフト化は  $1/T$  に比例するキュリー則から外れ、磁場依存性には原子空孔軌道特有の極小が表れる。そこで、厚み 0.77mm のウェーハ試料に僅かに屈曲させることで歪みを加え、四重項基底を 2 つのクラマス二重項へ分裂させる。歪みを加えた条件で、低温ソフト化とその磁場依存性を詳しく観測し、四重項基底が歪みでどのように分裂するかを解明し、原子空孔軌道の巨大な四極子歪み結合定数を調べる。

### (2) 高濃度原子空孔による構造相転移

原子空孔濃度が  $10^{12}$  / $\text{cm}^3$  と非常に希薄である場合は弾性定数がソフト化することから、原子空孔を取り囲む格子は立方晶であることを示している。しかし、 $10^{16}$  / $\text{cm}^3$  という高濃度の原子空孔を含む結晶の場合、Watkins らの EPR 実験より、ボロン添加シリコンの原子空孔軌道は正方対称に歪んでいると報告している。このことから、原子空孔軌道や原子空孔周りの格子の対称性は原子空孔濃度依存性を示すと考えられる。弾性定数  $C_T$  は四極子感受率  $\chi_T$  を用いて、 $C_T = C_0 - N g^2 \chi_T / (1 - g' \chi_T)$  と記述でき、ソフト化の大きさ  $\Delta C_T / C_T$  は原子空孔濃度  $N$  に比例する。ここで、 $g$  は四極子歪み結合定数、 $g'$  は四極子間相互作用、 $C_0$  は  $g=0$  のときの弾性定数である。四極子感受率を用いた解析を行う。

### (3) リン添加シリコンのソフト化

ボロン添加シリコンはホール添加だったのに対し、リン添加は電子ドープに対応する。そのためリン添加シリコンの原子空孔軌道は 5 個の電子を持ち電荷状態は  $V^-$  であり、原子空孔軌道の  $a_1$  一重項に 2 個の電子、 $t_2$  三重項に 3 個の電子が詰まっている状態に対応する。Watkins らの高濃度系の EPR 実験により原子空孔軌道の直方晶歪みが観測されている。これは希薄系における原子空孔軌道は軌道自由度を持っていることを示唆している。リン添加シリコンでも四極子歪み結合効果が重要であることを示しているため、超音波計測によるリン添加シリコンのソフト化とその磁場依存性を観測し、原子空孔軌道の量子状態を解明する。

## 4. 研究成果

(1) 常圧下において  $C_{44}$  が  $2.4 \times 10^{-4}$  のソフト化を示し、 $g=2.8 \times 10^5$  K、 $g'=-1.1$  K、 $N=6.1 \times 10^{13}$  / $\text{cm}^3$  であった試料に 0.8 GPa の静水圧を印加し測定すると、ソフト化の大きさは  $1.2 \times 10^{-4}$  に減少した。四極子感受率を用いた解析により、 $g=2.1 \times 10^5$  K、 $g'=-0.5$  K であることが分かった。四極子歪み相互作用  $g$  は原子空孔軌道の拡がり  $\langle r^2 \rangle$  の 2 乗に比例するので、0.8 GPa における原子空孔軌道の拡がりには常圧下のものに比べ、およそ 90% に減少することを明らかにした。また、四極子相互作用の絶対値が小さくなっていることから、反強的四極子相互作用が静水圧印加により小さくなったと言える。

表面弾性波 (SAW) による原子空孔軌道がもつ四極子の詳細な歪み応答を明らかにするために、曲げ応力による微小な外部歪み  $\delta_z$  をウェーハに室温で精度  $2 \times 10^{-6}$  で印加できるセルを開発した。応力なし ( $\delta_z=0$   $\mu\text{m}$ ) で  $4.7 \times 10^{-5}$  だけ示したソフト化が、応力の印加により、 $\delta_z=30$   $\mu\text{m}$  で  $2.5 \times 10^{-5}$ 、 $\delta_z=50$   $\mu\text{m}$  で  $0.6 \times 10^{-5}$  と抑制されること。さらにソフト化を示した最低温 38 mK で磁場を印加すると、 $\delta_z=0$   $\mu\text{m}$  で  $4.7 \times 10^{-5}$ 、 $\delta_z=30$   $\mu\text{m}$  で  $1.3 \times 10^{-5}$ 、 $\delta_z=50$   $\mu\text{m}$  で  $0.1 \times 10^{-5}$  だけ増大した。応力がない状態では 9 T の磁場印加によりソフト化が完全に回復されるのに対し、応力下のソフト化は磁場を印加しても完全に回復されない (図 1)。

開発した曲げ応力セルを用いてウェーハに応力を印加すると、ウェーハ表面には歪み  $\epsilon_{xx}$  を誘起し、他の歪み ( $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$ ,  $\epsilon_{yz}$ ,  $\epsilon_{zx}$ ,  $\epsilon_{xy}$ ) は励起しない、もしくは非常に小さく無視できる大きさである。歪み  $\epsilon_{xx}$  は対称歪み  $\epsilon_B$  と  $\epsilon_u$  により構成される。応力印加中の正方対称場で対称歪み  $\epsilon_B$  や  $\epsilon_u$  は原子空孔軌道の四極子  $Q_u$  と結合する。そのため、非常に小さな応力場の印加において、ハミルトニアンには  $g_{\Gamma_3} Q_u \epsilon_u$  という応力印加の場が加わることになる。そこで、そのハミルトニアンに対して、ウェーハ表面には SAW が誘起する四極子  $Q_u$ ,  $Q_v$ ,  $Q_x$  を考慮した四極子感受率を用いた解析を行った結果、ソフト化の抑制される様子を定性的に再現できた。また、 $g$  の符号により量子状態の分裂の仕方が変わり (図 2)、原子空孔軌道に働く四極子歪み相互作用  $g$  の符号は負であることを明らかにした。しかし、大きな応力を印加したときの定量性は再現できなかった。これは、考えている原子空孔軌道が  $l=1$  であるため、解析には全対称表現の電気 16 極子と対称歪み  $\epsilon_B$  との結合の効果が含まれていないため、体積変化の大きいところで定量性の問題が現れたと考えられる。

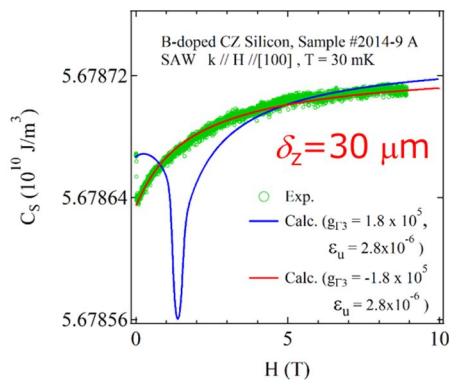


図 1 曲げ応力  $\delta_z=30$  mm の時のソフト化の解析結果

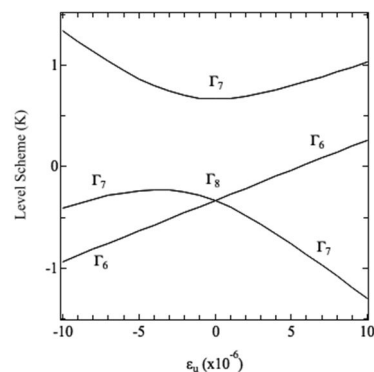


図 2  $\Gamma_8$  四重項、 $\Gamma_7$  二重項の四極子歪み相互作用による分裂の様子

そこで、原子空孔の周りに存在する4つのシリコン原子上の $sp^3$ 混成軌道が再結合してできる原子空孔軌道を原子空孔を原点に多極子展開することで解析的に求め、その波動関数をもつ電気多極子を求めた。原子空孔の点群は $T_d$ であるため、偶パリティの電気多極子のみならず奇パリティの電気多極子も自由度にもつ。それらのうち、点群 $T_d$ の既約表現 $A_1, E, T_2$ に属する電気多極子が有限の値をもち、他方、 $A_2, T_1$ に属する電気多極子はもたないことが分かった。そして、全対称表現である $A_1$ に属する電気多極子が表面弾性波が誘起する体積歪みと結合することで四極子歪み相互作用のみでは説明のつかないソフト化が現れたと言える。

(2)SUMCO TECHXIV社から購入した半導体産業で用いられるものと同品質のポロンドープFZシリコンから切り出した試料を2010年に超音波計測によりソフト化を観測したが、四極子感受率を用いた解析によりFZシリコンには原子空孔が $10^{13}/\text{cm}^3$ で存在し、同じ試料を2015年に再測定した結果、ソフト化を観測し、希薄に存在する原子空孔は室温以下で安定であることが分かった。グローバルウェーハズ・ジャパン社が育成した半導体産業で用いられるものと同品質のポロンドープCZシリコンインゴットから切り出した場所、インゴット中の原子空孔が凝集したポイド領域V、異常酸素析出領域AOP、原子空孔が多いと予想される領域Pv、格子間シリコンが多いと予想される領域Pi、格子間シリコンが集合した転位ループ領域I、によってソフト化の大きさは異なっていた。弾性定数の解析式を用いて原子空孔濃度 $N$ を見積もると、 $N$ は $10^{12}/\text{cm}^3$ のオーダーで存在することが分かり、インゴット中の原子空孔濃度分布が明らかになった。さらに、 $N$ が大きいと弾性定数がゼロになり、原子空孔軌道が四極子歪み結合により立方対称から低対称へと歪むことが考えられ(図3)、その臨界濃度 $N_c$ は $1.4 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ である(図4)。Watkinsらの電子スピン共鳴では、電子線照射により $10^{16} - 10^{18}/\text{cm}^3$ 程度の原子空孔をドープしたシリコンの原子空孔軌道は歪んでいると報告している。そのため、半導体産業で用いられるようなシリコンには原子空孔は希薄で、立方対称を保つ。そして原子空孔高濃度を大きくし臨界濃度を越えると四極子歪み相互作用の発達により低対称に歪むことが示唆される。

(3)リン添加シリコンの超音波実験を行い、極低温で降温に伴い弾性定数が減少するソフト化を観測した。今後、弾性定数の磁場中実験を行い、どのような磁場依存性を示すか明らかにする必要がある。そしてシリコン結晶にリンを添加する、つまり原子空孔軌道に電子を添加した量子状態を理論的に解明する必要がある。

#### <引用文献>

- "Observation of Low-Temperature Elastic Softening due to Vacancy in Crystalline Silicon", T. Goto, H. Y.- Kaneta, Y. Saito, Y. Nemoto, K. Sato, K. Kakimoto, and S. Nakamura, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 044602/1-6 (2006).
- "Elastic Softening of Surface Acoustic Wave Caused by Vacancy Orbital in Silicon Wafer", K. Mitsumoto, M. Akatsu, S. Baba, R. Takasu, Y. Nemoto, T. Goto, H.Y.- Kaneta, Y. Furumura, H. Saito, K. Kashima, and Y. Saito, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 034702/1-12 (2014).
- "Strong Quadrupole-Strain Interaction of Vacancy Orbital in Boron-Doped Czochralski Silicon", K. Okabe, M. Akatsu, S. Baba, K. Mitsumoto, Y. Nemoto, H.Y.- Kaneta, T. Goto, H. Saito, K. Kashima, and Y. Saito, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 124604/1-8 (2013).
- "Low-Temperature Softening Due to Vacancy Orbital with  $\Gamma_8$  Quartet Ground State in Boron-doped Floating Zone Silicon", S. Baba, M. Akatsu, K. Mitsumoto, S. Komatsu, K. Horie, Y. Nemoto, H. Y.-Kaneta, and T. Goto, J. Phys. Soc. Jpn. **82**, 084604/1-12 (2013).
- "Quadrupole Effects of Vacancy Orbital in Boron-Doped Silicon", S. Baba, T. Goto, Y. Nagai, M. Akatsu, H. Watanabe, K. Mitsumoto, T. Ogawa, Y. Nemoto, and H. Y.- Kaneta, J. Phys. Soc. Jpn. **80**, 094601/1-8 (2011).
- "Defects in Irradiated Silicon. I. Electron Spin Resonance of the Si-A Center", G. D. Watkins and J. W. Corbett, Phys. Rev. **121**, 1001-1014 (1961).

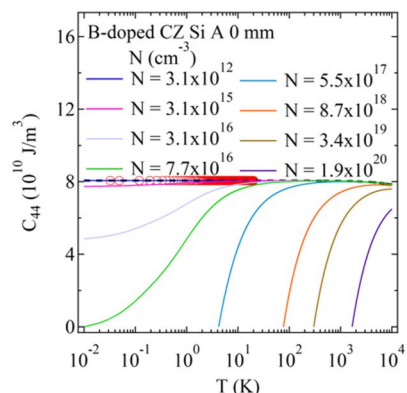


図3  $N$ を変えた時の $C_{44}$ の温度依存性

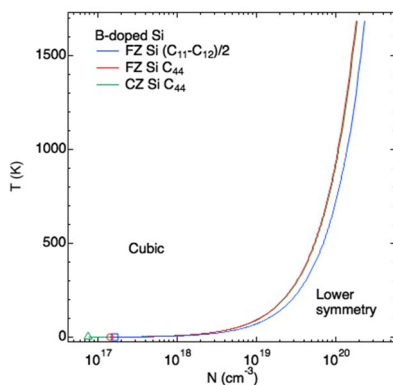


図4 構造転移温度 $T$ の $N$ 依存性



## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

- "Anisotropic phase diagram of ferroquadrupolar ordering in the trigonal chiral compound  $\text{DyNi}_3\text{Ga}_9$ ", I. Ishii, K. Takezawa, T. Mizuno, S. Kumano, T. Suzuki, Ninomiya Hiroki, Keisuke Mitsumoto, Kazunori Umeo, Shota Nakamura, and Shigeo Ohara, Phys. Rev. B **99**, 075156 (2019), 査読有, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.99.075156>.
- "Ferroquadrupolar Ordering due to the Quasi-degenerate Quartet in the Trigonal Chiral Structure of  $\text{DyNi}_3\text{Ga}_9$ ", I. Ishii, K. Takezawa, T. Mizuno, S. Kamikawa, H. Ninomiya, Y. Matsumoto, S. Ohara, K. Mitsumoto, and T. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 013602/1-4 (2018), 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.87.013602>.
- "Thermal expansion and magnetostriction of clathrate compound  $\text{Pr}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ ", K. Matsumoto, Y. Sekiguchi, O. Iwakami, T. Ono, S. Abe, G. Ano, M. Akatsu, K. Mitsumoto, Y. Nemoto, T. Goto, N. Takeda, and H. Kitazawa, J. Phys: Conf. Ser. **969**, 012120/1-6 (2018), 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/969/1/012120>.
- "Elastic softening due to the quadrupole interaction and anomalous magnetic phase diagram under the magnetic field in  $\text{HoRu}_2\text{Al}_{10}$ ", S. Kamikawa, I. Ishii, K. Takezawa, T. Mizuno, T. Sakami, F. Nakagawa, H. Tanida, M. Sera, T. Suzuki, K. Mitsumoto, and X. Xi, Phys. Rev. B **96**, 155131/1-9 (2017), 査読有, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.155131>.
- "Critical Slowing Down of Quadrupole and Hexadecapole Orderings in Iron Pnictide Superconductor", R. Kurihara, K. Mitsumoto, M. Akatsu, Y. Nemoto, T. Goto, Y. Kobayashi, and M. Sato, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 064706/1-27 (2017), 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.86.064706>.
- "Large magnetocaloric effect and adiabatic demagnetization refrigeration with  $\text{YbPt}_2\text{Sn}$ ", D. Jang, T. Gruner, A. Steppke, K. Mitsumoto, C. Geibel, M. Brando, Nature Commun. **6**, 8680/1-5 (2015), 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms9680>.

[学会発表](計 12 件)

- 古俣寿幸, 小日向智仁, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 三本啓輔, 「超音波計測によるリン添加シリコンの原子空孔軌道の研究」, 第 47 回 日本物理学会新潟支部例会, 2018 年 12 月 15 日, 新潟大学 五十嵐キャンパス (新潟県新潟市)
- 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 「ボロン添加シリコン中の原子空孔軌道の量子状態がもつ電気多極子効果」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 9 日-12 日, 同志社大学 京田辺キャンパス (京都府京田辺市)
- 三本啓輔, 坂井隼人, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 「応力印加によるボロン添加シリコン中の原子空孔軌道の四極子-歪み相互作用」, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日-25 日, 東京理科大学 野田キャンパス (千葉県野田市)
- 坂井隼人, 赤津光洋, 三本啓輔, 根本祐一, 後藤輝孝, 「表面弾性波による曲げ応力下でのシリコン原子空孔軌道の四極子-歪み相互作用の研究」, 第 46 回 日本物理学会新潟支部例会, 2017 年 12 月 9 日, 日本歯科大学新潟生命歯学部 (新潟県新潟市)
- 根本祐一, 坂井隼人, 赤津光洋, 三本啓輔, 後藤輝孝, 「弾性定数の低温ソフト化と磁場依存性によるシリコン原子空孔の量子状態解明」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21 日-24 日, 岩手大学 上田キャンパス (岩手県盛岡市)
- 坂井隼人, 赤津光洋, 三本啓輔, 根本祐一, 後藤輝孝, 「曲げ応力下でのボロン添加シリコンウェーハの原子空孔軌道の研究」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 21 日-24 日, 岩手大学 上田キャンパス (岩手県盛岡市)
- 三原佳祐, 坂井隼人, 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 「静水圧下超音波計測によるシリコン原子空孔軌道の研究」, 第 45 回 日本物理学会 新潟支部例会, 2016 年 12 月 10 日 新潟大学五十嵐キャンパス (新潟県新潟市)
- 坂井隼人, 三原佳祐, 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 「一軸圧下超音波計測による産業用シリコンウェーハの原子空孔軌道の研究」, 第 45 回 日本物理学会 新潟支部例会, 2016 年 12 月 10 日 新潟大学五十嵐キャンパス (新潟県新潟市)
- 三原佳祐, 坂井隼人, 三本啓輔, 赤津光洋, 根本祐一, 後藤輝孝, 「静水圧下超音波計測によるシリコン原子空孔軌道の研究」, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17 日-20 日 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府豊中市)
- K. Mitsumoto, M. Akatsu, S. Baba, R. Takasu, Y. Nemoto, T. Goto, H. Yamada-Kaneta, Y. Furumura, H. Saito, K. Kashima, Y. Saito, 「Observation of Vacancy in Crystalline Silicon by Surface Acoustic Wave Measurement」, BIT's 2nd Annual World Congress of Smart Materials-2016, March 4-6, 2016 (Singapore, Singapore), 招待講演
- 木村駿生, 岡部和樹, 赤津光洋, 馬場正太郎, 三本啓輔, 根本祐一, 金田寛, 後藤輝孝, 齊藤広幸, 鹿島一日兒, 齊藤芳彦, 「超音波計測による ボロン添加 CZ シリコンの原子空孔濃度の決定」, 第 44 回 日本物理学会 新潟支部例会, 2015 年 12 月 5 日 新潟大学五十嵐

キャンパス（新潟県新潟市）

三原佳祐，赤津光洋，三本啓輔，根本祐一，後藤輝孝，「静水圧下超音波計測による原子空孔軌道の研究」，第44回日本物理学会新潟支部例会，2015年12月5日新潟大学五十嵐キャンパス（新潟県新潟市）

## 6．研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：根本 祐一

ローマ字氏名：NEMOTO, Yuichi

研究協力者氏名：赤津 光洋

ローマ字氏名：AKATSU, Mitsuhiro

研究協力者氏名：後藤 輝孝

ローマ字氏名：GOTO, Terutaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。