

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2012

課題番号：22681020

研究課題名（和文）単一原子ドーピング法による単一原子デバイスの創製

研究課題名（英文） Fabrication of single-atom devices by single-atom doping method

研究代表者

品田 賢宏 (SHINADA TAKAHIRO)

産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門・研究部門付

研究者番号：30329099

研究成果の概要（和文）：

シリコンおよびダイヤモンド表面にドーパントの個数と位置を制御して配列することによって、従来統計的に観測されるに止まっていた単一ドーパント由来の量子現象が制御されつつある。原子スケールで材料、デバイス、プロセス制御を試みる技術群は、近年、国際半導体技術ロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductors: ITRS）でも取り上げられ、決定論的（deterministic）ドーピングと呼ばれ、量子情報処理をはじめとする新アーキテクチャと共に CMOS テクノロジーの延伸（Extended CMOS）への期待が寄せられている。事実、リンドナー2個、6個、10個をチャンネルに沿って“決定論的”に1次元配列させたシリコンデバイスを試作し、電気的特性を評価したところ、全てのデバイスから量子輸送現象を確認し、かつドーパントの増加に伴い量子輸送特性変化を観測した。また、ダイヤモンド表面にシリコンイオンを注入することによって、シリコンと空孔からなる Si-V センターの規則配列に成功し、量子情報処理におけるキーエレメントの1つである単一光子源の室温動作への可能性を示した。ドーパント添加型デバイスの極限形として、1個のドーパントが制御されたデバイス（単一ドーパントデバイス）原理実証、およびダイヤモンド中の単一発光センター評価に“決定論的”単一イオン注入法は有効手段となることを実証した研究成果である。

研究成果の概要（英文）：

The true potential of semiconductors, the basic material in transistors, has been realized by adding dopants to tailor their electronic properties; this has conventionally been achieved through a doping process. In the immediate future, scaled-down transistors will contain only a small number of dopants in the channel. Future CMOS technologies will require the placement of dopants in a predetermined location, namely, a single dopant control. This paper proposes deterministic doping which enables us to place dopants in predetermined locations to semiconductor materials as well as novel materials. Si transistors with deterministically implanted donors were fabricated by the method and their electrical transports were investigated. By placing donors in 1D/2D array, we observed the improved transistor performances and the quantum transport characteristics categorized into two regimes: single-electron tunneling through isolated states; Hubbard band formation due to the inter-donor coupling. Ordered array of Si-Vacancy (SiV) centers in diamond were formed by low energy ion implantation. Single photon emission from single SiV centers was observed at room temperature. The result makes SiV centers interesting as a single photon source in favorable quantum computing. Our deterministic doping method is more effective and reliable for single-atom devices and paves the way towards single atom nanoelectronics for extended CMOS applications.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000

2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	16,900,000	5,070,000	21,970,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：単一原子デバイス、単一ドーパントデバイス、単一原子ドーピング法、ドーピング、イオン注入、集束イオンビーム、シリコンデバイス、量子デバイス

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスの電気的特性を制御するために、通常、母体結晶と異なる原子、不純物（ドーパント）原子が意図的に導入される。従来、半導体中へのドーピングは均一に行われると考えられてきたが、ナノデバイスではこの仮定はもはや成立しない。例えば、ドーパント濃度が $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のとき、平均ドーパント間距離は 10nm となり、国際半導体技術ロードマップ(ITRS)において 2016 年に製品化が目標設定されているデバイス寸法 (9nm) とほぼ等しい。すなわち、ナノデバイスではドーパント原子の離散性が顕在化、そのランダムな分布故、デバイス毎にドーパント原子の個数および位置がゆらぎ、デバイス特性がバラつく結果、ナノデバイス構造が形成されても動作しないことはもはや明らかである。

実際、ドーパントゆらぎ問題は、1990 年代に入り多くの理論的研究が重ねられ、1994 年には東芝・水野氏(現、神奈川大)、鳥海氏(現、東大)らによる先駆的実験で確かめられている。最近では、竹内氏(NEC)、平本教授(東大)らが提案する Takeuchi Plot によってドーパントゆらぎが規格化され、統一的理解が進められている状況にある。

研究代表者らは、これまでに微小半導体中のドーパント原子個数のゆらぎを解消する目的で、ドーパントイオンを 1 個ずつ注入することができる単一イオン注入を開発し、ドーパント原子個数の統計的ゆらぎに起因する電気伝導度のゆらぎを 63% から 13% に抑制し、ドーパント原子個数だけでなく位置の制御も本質的に重要であることを初めて実験的に明らかにしていた。

2. 研究の目的

半導体デバイスの電気的特性を制御するために均一に導入されてきたドーパント原子は、微細化によって 10 年以内に数個程度になる。ランダムな分布故、今日、トランジスタの高性能化を妨げるドーパントゆらぎとして問題視されているものの、決定的な解決策は見出されていない。

本研究課題では、チャンネル領域に（たまたま存在する 1 個ではなく）真に 1 個のドーパ

ント原子が制御され、動作の基本となる単一ドーパント原子デバイスを創製することを目的とした。ドーパントゆらぎに解決の道筋を与え、次世代デバイス設計指針を与える他、量子コンピューター、単電子トランジスタをはじめ既存の CMOS テクノロジーの先に位置付けられる革新的デバイスの基盤となる基幹技術の確立を目指した。

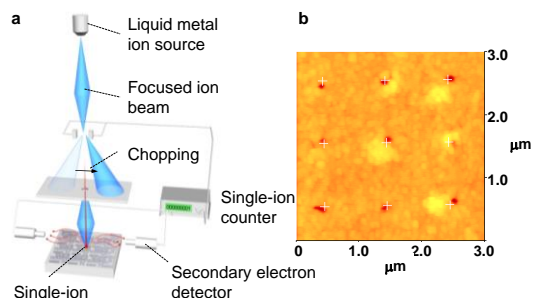


図 1 単一原子ドーピング法（原理）と単一イオン照射痕（原子間力顕微鏡像）

3. 研究の方法

研究期間を平成 22 年度～平成 24 年度の 3 年間とし、3 つの研究項目に取り組んだ。

(1) まず単一原子ドーピング法を用いて、1 個のドーパント原子由来の電気伝導現象の観測を試みた。これ自体 1 つの大きな挑戦であったため、計測が困難な場合を想定し、2 個～数個程度のドーパント原子を配置し、チャンネル領域のソース側、中央、ドレイン側に配置した場合のデバイス特性への影響を調査した。検出可能なバイアス、温度など最適条件を見出しつつ、必要に応じて測定環境の高感度化を図った。

(2) 研究項目 1 を受けて、チャンネル領域のある場所に 1 個のドーパントが制御されて、配置された真の単一ドーパントデバイスを作製すると共に、実証実験に着手した。

(3) 研究項目 1 および 2 と平行して、ガスイオン銃を導入することで注入可能なイオン種の拡充を図り、単一原子デバイスの多様化を図った。

4. 研究成果

(たまたま存在する 1 個ではなく) 真に 1 個のドーパント原子が制御され、動作の基本となる単一ドーパント原子デバイスを創製することに成功した。ドーパントゆらぎに解決の道筋を与え、次世代デバイス設計指針を与える他、量子コンピューターをはじめとする革新的デバイスの基盤となる基幹技術を確立したと考えている。具体的な研究成果は以下の通りである。

(1) 基板バイアス制御による単一イオン入射検出率の改善

単一原子ドーピング法において、単一イオンの入射は試料から放出される 2 次電子の検出によって確認している。従来、2 次電子放出率が十分でない結果、検出率は 90% に止まっていた。単一イオン注入中、デバイスに基板バイアス印加機構を開発し、基板バイアス制御によって 2 次電子放出率を増加させ、入射検出率を 100% に改善した

(2) 非対称ドーパント規則配列

ドーパントをチャネルのドレイン側に配置することによって駆動電流が増加する現象を見出したことを受け、今回、規則的な非対称ドーパントを有するトランジスタを試作し、特性への影響を調査した。ランダムにドレイン側に配置したトランジスタと比較し、約 23% 増加することを確認した。電子の入射速度低下の抑制効果と均一なポテンシャル形成よると結論づけた。

(3) 位置のみ制御されたドーパント規則配列

ドーパント個数を意図的に制御せず、位置のみ制御されたドーパント規則配列を有するトランジスタを試作し、ランダム分布のものと比較した。約 23% ばらつきが抑制されることを実証した。これは個数はばらつきでも位置のみ制御でもばらつき抑制効果があることを示す初めての結果である。

(4) 単一ドーパント 1 次元規則配列デバイスの試作と量子輸送現象の観測

リンドナー 2 個、6 個、10 個をチャネルに沿って 1 次元配列させたシリコンデバイスを試作し、電気的特性を評価した。4.2K~20K の温度領域において、しきい値電圧以下において局所的な電流ピークが観察された。これは、電子が孤立ドナー準位を介してクーロンブロッケードに基づく単電子トンネリングによる伝導現象を示している。また、電流ピークの数は注入したイオン個数と一致しており、単一イオン注入法の個数・位置制御性の高さも合わせて示している。またリンドナー数の増加と共に 1 個のドナーが有する 2 つの準位 D^0 と D^- を介する単一電子トンネリン

グからドナー間カップリングによる Hubbard バンドの形成に起因する電気的特性が観測された。従来、多数のデバイス計測から偶然、観測されるに止まっていたが、本研究では試作した全てのデバイスから量子現象を観測し、単一ドーパント研究の効率を格段に高めた成果である。

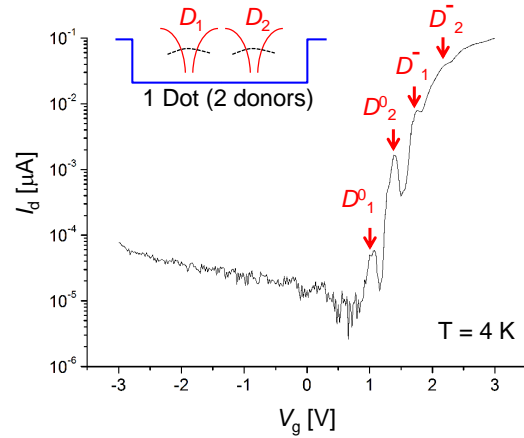


図 2 代表的な量子輸送特性 (1 ドット 2 ドナーデバイス)

(5) ダイヤモンドへの低エネルギーイオン注入による発光センターの生成

室温で光学的にアクセス可能な量子ビットとして有望視されているダイヤモンド中の Si-Vacancy (Si-V) センターをダイヤモンド表面に規則配列を試みた。カソードルミネッセンス測定によって、Si イオン注入に起因する発光センター 738 nm が室温下で明瞭に観測され、Si-V センターの規則配列に世界に先駆けて成功した。Si 注入イオン数と (Si-V) センターの PL 発光強度に正の相関を確認し、収率は現在のところ 1% 程度であるが、ダイヤモンド表面処理が極めて重要であることを確認した。活性化アニールによって Si-V 構造が生成する収率が改善することも確認した。発光強度とイオン注入量濃度に強い相関もみられ、単一 Si-V を生成する準備が整った。

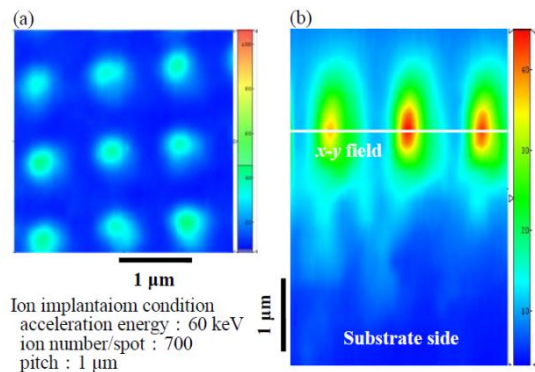


図 3 規則配列された (Si-V) センター (共

焦点顕微鏡像)

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 6 件)

- ① E. Prati, M. Hori, F. Guagliardo, G. Ferrari, T. Shinada, “Anderson–Mott transition in arrays of a few dopant atoms in a silicon transistor”, *Nature Nanotechnology* 7, 442-447 (2012).
- ② T. Shinada, M. Hori, F. Guagliardo, G. Ferrari, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endo, Y. Ono, E. Prati, “Quantum transport in deterministically implanted single-donors in Si FETs”, *Tech. Dig. of International Electron Devices Meeting (IEDM)* 697 (2011).
- ③ M. Hori, T. Shinada, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, “Impact of a few Dopant Positions Controlled by Deterministic Single-Ion Doping on the Transconductance of Field-Effect Transistors”, *Appl. Phys. Lett.* 99, 062103 (2011).
- ④ M. Hori, T. Shinada, K. Taira, A. Komatsubara, Y. Ono, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, “Enhancing Single-Ion Detection Efficiency by Applying Substrate Bias Voltage for Deterministic Single-Ion Doping”, *Appl. Phys. Express* 4, 046501 (2011).
- ⑤ T. Shinada, M. Hori, Y. Ono, K. Taira, A. Komatsubara, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, “Performance evaluation of MOSFETs with discrete dopant distribution by one-by-one doping method”, *Tech. Dig. of International Electron Devices Meeting (IEDM)*, 592 (2010).
- ⑥ T. Shinada, M. Hori, Y. Ono, K. Taira, A. Komatsubara, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, “Performance evaluation of MOSFETs with discrete dopant distribution by one-by-one doping method”, *Proc. of SPIE* 7637, 763712, (2010).

[学会発表] (計 24 件)

- ① 田村崇人, 小松原 彰, 寺地 徳之, 小野田 忍, 大島 武, Christoph MChristoph M Christoph M Christoph M Christoph Müllerllerller, BorisBoris Boris NaydenovNaydenov ,

LiamLiamLiam McG uinnessinness 4, Fedor Fedor Jelezko, 品田 賢宏, 磯谷 順一, 谷井 孝至, “ダイヤモンドへの低エネルギーイオン注入による発光センターの規則配列作製Ⅱ”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 03 月 27 日, 神奈川工科大学 (神奈川県).

- ② 品田賢宏, “単一イオン注入技術シリコン/ダイヤモンドへの決定論的ドーピングによる量子物性制御”, 日本学術振興会「結晶加工と評価技術」第 1 4 5 委員会, 2013 年 01 月 21 日, 明治大学 (東京都). [招待講演]
- ③ A. Komatsubara, Tokuyuki Teraji, Masahiro Hori, Kuninori Kumagai, Shuto Tamura, Takeshi Ohshima, Shinobu Onoda, Takashi Yamamoto, Christoph Müller, Boris Naydenov, Liam McGuinness, Fedor Jelezko, Takashi Tani, Takahiro Shinada, Junichi Isoya, “Fabrication of the ordered array of optical centers in diamond by low energy ion implantation”, *International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC) 2012*, Kobe, November 2, 2012.
- ④ 堀 匡寛, Enrico Prati, 熊谷国憲, Filippo Guagliardo, Giorgio Ferrari, 谷井孝至, 小野行徳, 品田賢宏, “シングルイオン注入法を用いた単一ドープメント原子を有するトランジスタの作製と低温伝導特性評価”, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012 年 9 月 14 日, 愛媛大学・松山大学 (愛媛県).
- ⑤ 小松原彰, 堀 匡寛, 熊谷国憲, 谷井孝至, 寺地 徳之, 磯谷 順一, 品田賢宏, “ダイヤモンドへの低エネルギーイオン注入による発光センターの規則配列作製”, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 2012 年 9 月 13 日, 愛媛大学・松山大学 (愛媛県).
- ⑥ M. Hori, E. Prati, F. Guagliardo, G. Ferrari, K. Kumagai, T. Tani, Y. Ono, T. Shinada, “Quantum Transport Property in FETs with Deterministically Implanted Single-Arsenic Ions Using Single-ion Implantation”, *2012 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop*, Hawaii, US, June 11, 2012.
- ⑦ T. Shinada, “Deterministic doping to Si and diamond for nanoelectronics”, *International Nanotechnology Conference (INC8)*, Tsukuba, May 8, 2012.
- ⑧ T. Shinada, M. Hori, A. Komatsubara,

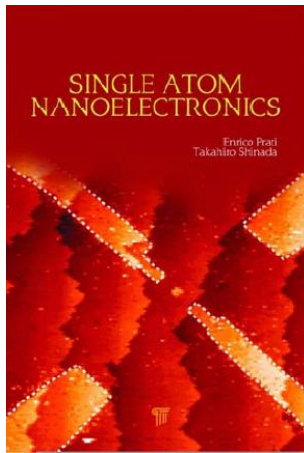
- K. Kumagai, Y. Sakaguchi, T. Tani, Y. Ono, F. Guagliardo, G. Ferrari, E. Prati, "Deterministic doping for nanoelectronics and the application to biological system", Energy Materials Nanotechnology Meeting, April 16-20, Orlando, US. [招待講演]
- ⑨ T. Shinada, M. Hori, K. Kumagai, F. Guagliardo, G. Ferrari, Y. Ono, E. Prati, "Single ion implantation as a method for local doping", International Conference on Ion Implantation Technology, June 25-29, 2012, Valladolid, Spain. [招待講演]
- ⑩ T. Shinada, M. Hori, F. Guagliardo, G. Ferrari, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endo, Y. Ono, E. Prati, "Quantum transport in deterministically implanted single-donors in Si FETs", IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), Washington, DC, USA, December 2011.
- ⑪ M. Hori, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, T. Shinada, "Impact of a few Dopant Positions Controlled by Deterministic Single-Ion Doping on Transconductance of FETs", TECHCON2011, Austin, Texas, USA, September 2011.
- ⑫ 品田賢宏, 堀匡寛, 小野行徳, 田部道晴, "単一イオン注入プロセス: 1nm 精度への挑戦", 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011 年 8 月, 山形大学 (山形県).
- ⑬ 堀 匡 寛 , Enrico Prati, Filippo Guagliardo, 小野行徳, 小松原彰, 熊谷国憲, 谷井孝至, 遠藤哲郎, 大泊 巖, 品田賢宏, "単一イオン注入法による位置と個数を制御したデバイスの低温伝導特性評価", 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011 年 9 月, 山形大学 (山形県).
- ⑭ 小松原 彰, 堀 匡寛, 熊谷国憲, 小野行徳, 谷井孝至, 遠藤哲郎, 大泊 巖, 品田賢宏, "砒素イオン注入によるドーパント位置制御効果", 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011 年 9 月, 山形大学 (山形県).
- ⑮ T. Shinada, M. Hori, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, "Control of Dopant Distribution by Single-Ion Implantation and its Impact on Transconductance of FETs", 2011 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2011), June 2011. [招待講演]
- ⑯ E. Prati, M. Hori, F. Guagliardo, G. Ferrari, T. Shinada, "Quantum transport in a deterministically implanted phosphorous array in a Silicon nanostructure", 2011 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, Japan, June 2011.
- ⑰ M. Hori, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, T. Shinada, "Impact of a few Dopant Positions Controlled by Single-Ion Implantation on Transconductance of FETs", International Workshop on Junction Technology (IWJT 2011), Kyoto, Japan, June 2011.
- ⑱ 堀匡寛, 品田賢宏, 平圭吾, 小松原彰, 小野行徳, 谷井孝至, 遠藤哲郎, 大泊巖, "ドーパント位置制御による電界効果トランジスタの相互コンダクタンス評価", 第 58 回応用物理学関連連合講演会, 2011 年 3 月, 神奈川大学 (神奈川県).
- ⑲ 品田賢宏, 堀匡寛, 平圭吾, 小松原彰, 谷井孝至, 大泊巖, 小野行徳, 遠藤哲郎, "単一原子ドーピング法と離散的ドーパントデバイス評価", 電気学会電子デバイス研究会, 2011 年 3 月 (群馬県). [招待講演].
- ⑳ T. Shinada, M. Hori, Y. Ono, K. Taira, A. Komatsubara, T. Tani, T. Endoh, I. Ohdomari, "Performance evaluation of MOSFETs with discrete dopant distribution by one-by-one doping method", International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, USA, December 2010.
- ㉑ M. Hori, T. Shinada, A. Komatsubara, K. Taira, T. Tani, Y. Ono, T. Endoh, I. Ohdomari, "Improving Single Dopant Detection Efficiency by Controlling Substrate Bias in Single Ion Implantation Method", TECHCON2010, Austin, Texas, USA, September 2010.
- ㉒ 堀 匡寛, 小松原 彰, 品田賢宏, 小野行徳, 平 圭吾, 谷井孝至, 遠藤哲郎, 大泊巖, "基板バイアス印加による単一イオン個数制御性の検証", 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010 年 9 月, 長崎大学 (長崎県).
- ㉓ T. Shinada, M. Hori, K. Taira, T. Tani, Y. Ono, T. Endoh, I. Ohdomari, "Performance evaluation of transistors with discrete dopants by single-ion doping method", 21st International Conference on the Application of

Accelerators in Research and Industry (CAARI2010), Fort Worth, TX, USA, August 8-13, 2010 [招待講演].

- ② M. Hori, T. Shinada, K. Taira, T. Tani, Y. Ono, T. Endoh, I. Ohdomari, "Enhancement of Electron Transport Property in FET with Asymmetric Ordered Dopant Distribution", 18th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT2010), Kyoto, June 7, 2010.

[図書] (計 1 件)

- ① E. Prati and T. Shinada Editors, "Single Atom Nanoelectronics" Pan Stanford Publishing (2013).



[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称：半導体装置
発明者：品田賢宏, 小野行徳
権利者：早稲田大学, NTT
種類：
番号：特許公開 2012-009496
出願年月日：2012 年 1 月
国内外の別：国内

名称：イオン注入方法
発明者：品田賢宏, 小野行徳
権利者：早稲田大学, NTT
種類：
番号：特願 2011-096900
出願年月日：2011 年 4 月
国内外の別：国内

名称：半導体装置
発明者：品田賢宏, 小野行徳
権利者：早稲田大学, NTT
種類：
番号：特願 2010-141686
出願年月日：2010 年 6 月

国内外の別：国内

[その他]
ホームページ等

早稲田大学ニュースリリース「単一ドーパント原子が制御された量子デバイスを開発 高等研究所・品田賢宏准教授らの国際共同研究チーム」(2011 年 12 月 8 日)
http://www.waseda.jp/jp/news11/111208_sad.html

日経エレクトロニクス「【IEDM】数十個のチャンネル不純物の分布が MOS トランジスタ特性に与える影響, 早稲田大学などが実デバイスで検証」(2010 年 12 月 9 日)
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20101202/187858/?ST=SCR>

早稲田大学プレスリリース「高等研究所・品田賢宏准教授らがドーパント分布を制御し、トランジスタ特性を向上 単一ドーパント原子が制御された究極のデバイス開発に道」(2010 年 12 月 9 日)
http://www.waseda.jp/jp/news10/101208_sad.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

品田 賢宏 (SHINADA TAKAHIRO)
産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門・研究部門付
研究者番号：22681020