

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289109

研究課題名(和文) 決定論的ドーピング法による量子物性制御

研究課題名(英文) Control of quantum material properties by deterministic doping method

研究代表者

品田 賢宏 (Shinada, Takahiro)

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：30329099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、10nm以下の領域へのドーピングを実現し、次世代デバイスに適応可能な決定論的ドーピング法の確立を第1の目的とし、単ドーパントシリコンデバイス、単シリコン-空孔ダイヤモンドデバイスをはじめとする量子デバイスの物性制御を第2の目的とした。具体的には、10nm以下の領域への単ドーパントドーピングプロセスモジュールの開発に成功し、単ドーパントシリコンデバイス量子輸送、及び単ドーパントシリコン-空孔ダイヤモンド量子発光の観測と制御に成功した。将来のCMOSテクノロジーの延伸に資する決定論的ドーピング法の確立、及びその量子物性制御を実現したことは大きな成果である。

研究成果の概要(英文)：The first purpose of this study was to establish a deterministic doping method that realizes doping to regions of 10 nm or less and is applicable to next generation devices. The second purpose was to control physical properties of quantum devices including single dopant silicon devices and single silicon - vacancy diamond devices. Specifically, we have developed (1) a single dopant doping process module in the region of 10 nm or less. We succeeded in observation and control of (2) quantum transport in single dopant silicon devices and (3) luminescence from single dopant silicon - vacancy in diamonds. Establishment of the deterministic doping method contributing to the future extension of CMOS technology and realization of its quantum physical property control are major achievements.

研究分野：電子工学

キーワード：決定論的ドーピング ドーパント規則配列 シリコン量子物性 ダイヤモンド量子物性 3次元アトムブローブ

1. 研究開始当初の背景

トランジスタの電気的特性を制御するために、長年、イオン注入法によってドーパントが導入されてきた。1970年代にLSIが世に出て以来、トランジスタの微細化を牽引し、半世紀にわたって半導体の発展に寄与してきた。今日、トランジスタ寸法は20~30nm、まもなく10nmに迫っており、目下、ランダムに分布するドーパントゆらぎによる特性ばらつきが大問題となっている。

この問題は、1990年代、理論的研究が先行し[1]、1994年に東芝・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[2]、近年、竹内氏(NEC)、平本教授(東大)らによって、統一的な理解が進められている[3]。今やトランジスタの微細化を牽引してきたドーピングが厄介者となり、ドーパントを使わないノンドーパントトランジスタ開発が主流となっているが、ノンドーパントトランジスタの代表格であり、2012年に実用化された3次元トランジスタ(Ivy Bridgeに搭載)には、閾値電圧調整のためドーピングが施されていることが判明しており(申請者が2011年12月に開発責任者Mark Bohr氏に直接確認)、依然ドーピングに頼らなければならない状況にある。

いま、原子レベルでのドーパント制御が強く求められている。半導体技術の向こう15年~20年のガイドラインを提言する国際半導体技術ロードマップ(ITRS)では、現在、決定論的(Deterministic)ドーピングと呼ばれ、実用化に期待が寄せられている[4]。なお、Deterministicドーピングは、候補者が提唱したコンセプトである。

[1] A. Asenov, IEEE Trans. Electron Devices 45 2505 (1998). [2] T. Mizuno, et al., IEEE Trans. Electron Devices 41, 2216-2221 (1994). [3] K. Takeuchi, et al., IEDM Tech. Dig., 467 (2007). [4] ITRS Emerging Research Materials (ERM) Chapter.

2. 研究の目的

研究代表者らは、これまでに、世界的にも未だ優位性を有する単一イオン注入法を用いて、ドーパント規則配列によるトランジスタ特性向上の実証[5]、ドーパント配列が特性に及ぼす影響の系統的調査[6, 7]を手掛けてきた実績を有する。本研究では、10nm以下の領域へのドーピングを実現し、次世代デバイスに適用可能な決定論的ドーピング法の確立を第1の目的とし、世界初となる単一ドーパント3次元規則配列を最終目標とした。単一ドーパントシリコンデバイス、単一シリコン-空孔ダイヤモンドデバイスをはじめとする量子デバイスの物性制御を第2の目的とした。将来のCMOSテクノロジーの延伸に資する決定論的ドーピング法を確立し、実証した。

[5] T. Shinada, et al., Nature 437, 1128-1131 (2005). [6] T. Shinada, IEDM 2010, [7] T. Shinada, IEDM 2011. [8] T. Shinada, et al., Nanotechnology, 19, 345202, (2008).

3. 研究の方法

研究期間を平成25年度~28年度の4年間とし、3つの研究項目に取り組んだ。(1)まず、1個のドーパントを10nm以下の領域に注入するプロセスモジュールを開発した。研究協力者のY.-J. Lee博士(台湾National Nano Device Laboratory)の協力を得て、注入イオンを低温で活性化させるプロセスとのインテグレーションを図った。共同研究者の井上耕治准教授(東北大学)と共にレーザー3次元アトムプローブ(ATP)法によってドーパント分布を解析した。ATPによる単一ドーパント検出自体、大きな挑戦であり、検出可能なドーパント個数の下限を見極めた。(2)研究協力者のEnrico Prati博士(イタリア学術研究会議)の協力を得て単一ドーパントシリコンの量子輸送特性、(3)研究協力者の磯谷順一教授(筑波大)の協力を得て、単一シリコン-空孔ダイヤモンドの量子発光特性を評価した。最終年度までに単一ドーパント3次元規則配列形成に取り組んだ。

4. 研究成果

平成25年度

研究項目1「10nm以下の領域への単一ドーパントドーピングプロセスモジュールの開発」

10nm以下の領域への単一ドーパントのドーピングを可能とするために、電子線リソグラフィによってチャネル領域に10nm以下の単一孔を有するレジスト形成を試みた(早稲田大学との共同)。3次元アトムプローブ法によってドーパントの注入分布を評価するためのスキームを構築した。

平成26年度

研究項目1「10nm以下の領域への単一ドーパントドーピングプロセスモジュールの開発」

単一イオン注入装置の照準精度の向上のために、有機レジストナノホールマスクを介して単一イオンを注入するための条件出しを行い、位置合わせ精度と直径ともに20nm以下にできる条件を見出した。3次元アトムプローブで注入イオンの基板内分布を測定できる手ごたえを得た。

研究項目2「単一ドーパントシリコンデバイス量子輸送」

単一イオン注入装置を用いて、Erを打ち込むための新液体金属イオン源AuSiErの開発に成功した。Siデバイス中にErとOを共注入することが可能となり、シリコンフォトリ

クスの応用が可能となった。また、1 μ m のチャネル長を持つチャネルに 10 nm ピッチで Ge イオンを注入したところ、Ge バンドの電子輸送を室温でも観測できることを見出した。

研究項目 3 「単ドーパントシリコン - 空孔ダイヤモンド量子発光」

単一イオン注入装置を用いて、単結晶ダイヤモンド薄膜に Si 原子を打ち込み、Si と空孔からなる SiV センタを作製し、ドースと生成収率との関係を明らかにした。1 スポットあたり 20 個の Si 原子を打ち込むと、生成収率 15% で負に帯電した SiV センタが生成されること、形成したスポットの中に単一の SiV-センタも存在すること、単一 SiV-センタが単一光子源として機能すること、長時間の熱処理より輝度が十分に高くなることを見出した。

平成 27 年度

研究項目 1 「10nm 以下の領域への単ドーパントドーピングプロセスモジュールの開発」

10nm 領域への単ドーパント導入プロセスを開発し、注入された単ドーパントを可視化するために、3 次元アトムプローブによる評価を行った。測定針試料作製方法や測定条件の検討を行い、局所的に注入されたイオンの検出に初めて成功した。シミュレーションによる結果と比較し、イオン注入分布が正しく検出されたことを確認した。

研究項目 2 「単ドーパントシリコンデバイス量子輸送」

単ドーパントが作る量子準位に基づく Si 中の量子的電子輸送特性解析のため、チャネル中に比較的深い不純物準位を形成する Ge を注入し、低温から室温までの電気伝導特性評価を行った。注入された Ge による複合欠陥が再現され、チャネル中に 1 次元的に Ge を配置することで不純物バンドが形成し、チャネル長 100 nm では室温下で不純物バンドを介した電子輸送を観測した。

研究項目 3 「単ドーパントシリコン - 空孔ダイヤモンド量子発光」

電子線リソグラフィを用いて、ダイヤモンド上のレジストマスクに直径約 10 nm のナノホール配列形成に成功した。マスクを介して低エネルギー窒素イオン注入を行うことによって、NV-センタの位置と個数をおおよそ制御して作製可能となった。表面バックグラウンドは低く、作製した NV- の電荷が安定であることを確認した。コヒーレンス時間は $\sim 3.1 \mu$ s であり、光検出磁気共鳴による評価では、1 スポットに 3 個の NV- センタが形成されたことを確認した。

平成 28 年度

研究項目 1 「10nm 以下の領域への単ドーパントドーピングプロセスモジュールの開発」

Si 中に局所的に注入されたイオンの分布についてアトムプローブで実験的に評価をした。アトムプローブでの 3 次元再構成を丁寧に行い、信頼あるイオンの分布を得た。その分布の深さ方向および面内方向の広がりについて、シミュレーション結果との比較を行い、ほぼコンシステントであり、イオン注入の空間精度の確認をした。

研究項目 2 「単ドーパントシリコンデバイス量子輸送」

単ドーパントが作る量子準位に基づく Si 中の量子的電子輸送特性解析のため、チャネル中に Er イオンと O イオンを同時に注入し、光励起電流特性を計測した。Er 準位を介して光が吸収され、光励起電流としてチャネルを流れたことを初めて確認した。

研究項目 3 「単ドーパントシリコン - 空孔ダイヤモンド量子発光」

電子線リソグラフィを用いて、ダイヤモンド上のレジストマスクに直径約 10 nm のナノホール配列を形成し、マスクを介して低エネルギー窒素イオン注入を行い、水素原子核スピン検出が可能か検証した。共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡(CFM)を用いて、NV-センタの特性を評価したところ、水素の核スピンに由来するピークの観測に成功した。

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 5 件)

- [1] Enrico Prati, Kuninori Kumagai, Masahiro Hori, Takahiro Shinada, Band transport across a chain of dopant sites in silicon over micron distances and high temperatures, Scientific Reports, 6, 2016, 19704-1-19704-8. (査読有り)
- [2] Yan Liu, Petr Siyushev, Youying Rong, Botao Wu, Liam Paul McGuinness, Fedor Jelezko, Syuto Tamura, Takashi Tani, Tokuyuki Teraji, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Junichi Isoya, Takahiro Shinada, Heping Zeng, and E Wu, Investigation of the silicon vacancy color center for quantum key distribution, Optics Express, 23, 2015, 32961 – 32967. (査読有り)
- [3] Yan Liu, Gengxu Chen, Youying Rong, Liam Paul McGuinness, Fedor Jelezko, Syuto Tamura, Takashi Tani, Tokuyuki Teraji, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Junichi Isoya,

- Takahiro Shinada, E Wu, Heping Zeng, Fluorescence Polarization Switching from a Single Silicon Vacancy Colour Centre in Diamond, Scientific Reports, 5, 2015, 12244-1-12244-9. (査読有り)
- [4] Syuto Tamura, Godai Koike, Akira Komatsubara, Tokuyuki Teraji, Shinobu, Onoda, Liam P. McGuinness, Lachlan Rogers, Boris Naydenov, E. Wu, Liu Yan, Fedor Jelezko, Takeshi Ohshima, Junichi Isoya, Takahiro Shinada, and Takashi Tanii, Array of bright silicon-vacancy centers in diamond fabricated by low-energy focused ion beam implantation, Appl. Phys. Express., 7, 2014, 115201(1-4). (査読有り)
- [5] Enrico Prati, Takahiro Shinada, Atomic scale devices: advancements and directions, Technical Digest of 2014 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2014, 9-12. (査読有り)
- [学会発表](計 27 件)
- [1] 清水 康雄、涂 远、アブデルガファ 愛満、矢野 真麻、鈴木 雄大、谷井 孝至、品田 高宏、Prati Enrico、井上 耕治、永井 康介、シリコン中に形成されたエルビウム不均一分布の 3 次元アトムプローブ評価、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 16 日、パシフィコ横浜 (横浜)
- [2] アブデルガファ ターレック 愛満、矢野 真麻、千葉 悠貴、Prati Enrico、Celebrano Michele、Ghirardini Lavinia、Finazzi Marco、Ferrari Giorgio、品田 高宏、谷井 孝至、Er:O 共注入 Si MOSFET のフォトルミネッセンスおよび光励起電流計測、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 16 日、パシフィコ横浜 (横浜)
- [3] 福田 諒介、東又 格、岡田 拓真、加賀美 理沙、寺地 徳之、小野田 忍、春山 盛善、山田 圭介、稲葉 優文、山野 颯、Priyadharshini Balasubramanian、Felix Stuermer、Simon Schmitt、Liam McGuinness、Fedor Jelezko、大島 武、品田 高宏、川原田 洋、加田 涉、花泉 修、磯谷 順二、谷井 孝至、浅い単一 NV センターの規則的配列を用いた表面の水素核スピンの検出、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 15 日、パシフィコ横浜 (横浜)
- [4] 小野田 忍、立見 和雅、春山 盛善、寺地 徳之、磯谷 順二、山田 圭介、谷井 孝至、川原田 洋、品田 高宏、加田 涉、花泉 修、大島 武、イオン注入による原子空孔の形成と NV センターへの変換効率、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 15 日、パシフィコ横浜 (横浜)
- [5] 品田 高宏、ITRS エマージングデバイス (ERD) レビュー ~ IRDS へ繋ぐ ~、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14 日、パシフィコ横浜 (横浜)
- [6] Y. Tu, B. Han, Y. Shimizu, K. Inoue, M. Yano, Y. China, T. Tanii, T. Shinada, Y. Nagai, Direct Observation of Single Ion Implanted Dopants Distribution in Silicon by Atom Probe Tomography, 2016 MRS Fall Meeting, 2016 年 11 月 29 日, Boston, Massachusetts, USA
- [7] 東又 格、岡田 拓真、加賀美 理沙、寺地 徳之、小野田 忍、春山 盛善、山田 圭介、稲葉 優文、山野 颯、Priyadharshini Balasubramanian、Felix Stuermer、Simon Schmitt、Liam P. McGuinness、Fedor Jelezko、大島 武、品田 高宏、川原田 洋、加田 涉、花泉 修、磯谷 順二、谷井 孝至、量子センシングのための浅い単一 NV センターの規則配列形成: イマージョンオイル中の水素核スピン計測、第 30 回ダイヤモンドシンポジウム、2016 年 10 月 14 日、東京大学駒場リサーチキャンパス (東京)
- [8] 東又 格、岡田 拓真、加賀美 理沙、寺地 徳之、小野田 忍、春山 盛善、山田 圭介、稲葉 優文、山野 颯、Priyadharshini Balasubramanian、Liam P McGuinness、Boris Naydenov、Fedor Jelezko、大島 武、品田 高宏、川原田 洋、加田 涉、花泉 修、磯谷 順二、谷井 孝至、ナノホールレジストマスクを用いた低エネルギーイオン注入による量子センシングのための NV センター配列の作製、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 13 日、朱鷺メッセ (新潟)
- [9] 岡田 拓真、東又 格、加賀美 理沙、寺地 徳之、小野田 忍、山田 圭介、春山 盛善、稲葉 優文、山野 颯、Priyadharshini Balasubramanian、Boris Naydenov、Liam McGuinness、Fedor Jelezko、大島 武、品田 高宏、川原田 洋、加田 涉、花泉 修、磯谷 順二、谷井 孝至、ナノホールレジストマスクを用いた NV センター配列の作製 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 13 日、朱鷺メッセ (新潟)
- [10] 加賀美 理沙、東又 格、岡田 拓真、寺地 徳之、小野田 忍、春山 盛善、大島 武、品田 高宏、加田 涉、花泉 修、磯谷 順二、谷井 孝至、イオン注入を用いた SiV センターの作製と生成収率のエネルギー依存性評価、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、2016 年 9 月 13 日、朱鷺メッセ (新潟)

- [11] T. Shinada, E. Prati, T. Tani, T. Teraji, S. Onoda, F. Jelezko, J. Isoya, Deterministic doping to silicon and diamond materials for quantum processing, 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE NANO 2016), 2016年8月25日, Sendai, Japan
- [12] T. Shinada, E. Prati, T. Tani, T. Teraji, S. Onoda, F. Jelezko, J. Isoya, Deterministic doping for quantum processing devices in silicon and diamond, EMN Meeting on Quantum 2016, 2016年4月8日, Phuket, Thailand
- [13] Tu Yuan, Han Bin, Shimizu Yasuo, Inoue Koji, Yano Maasa, Chiba Yuki, Tanii Takashi, Shinada Takahiro, Nagai Yasuyoshi, Distribution of Single-Ion Implanted Dopants in Silicon Investigated by Atom Probe Tomography, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年03月19日, 東京工業大学(東京)
- [14] 小池 悟大, 東又 格, 寺地 徳之, 小野田 忍, 稲葉 優文, P. Balasubramanian, B. Naydenov, F. Jelezko, 大島 武, 品田 高宏, 川原田 洋, 磯谷 順一, 谷井 孝至, ナノホールレジストマスクを用いた NV センタ配列の作製, 第29回ダイヤモンドシンポジウム, 2015年11月18日, 東京理科大学(東京)
- [15] 東又 格, 小池 悟大, 寺地 徳之, 小野田 忍, 稲葉 優文, Priyadharshini Balasubramanian, Boris Naydenov, Fedor Jelezko, 大島 武, 品田 高宏, 川原田 洋, 磯谷 順一, 谷井 孝至, ナノホールレジストマスクを用いた NV センタ配列の作製, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年09月15日, 名古屋国際会議場(名古屋)
- [16] 千葉 悠貴, 矢野 真麻, アブデルガファ 愛満, Enrico Prati, 品田 高宏, 谷井 孝至, Ge の 1 次元配列を有する MOS トランジスタの室温伝導特性, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年09月15日, 名古屋国際会議場(名古屋)
- [17] 矢野 真麻, 千葉 悠貴, 清水 康雄, 井上 耕治, 永井 康介, 谷井 孝至, 品田 高宏, ナノホールマスク注入ドーパントイオン分布の 3 次元アトムプローブ計測-シングルイオン注入法の照準位置精度の向上-, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015年09月14日, 名古屋国際会議場(名古屋)
- [18] Enrico Prati, Takahiro Shinada, Atomic scale devices: advancements and directions (Plenary), 2014 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (招待講演), 2014年12月15日, Hilton San Francisco Union Square, San Francisco, USA
- [19] Takahiro Shinada, Prati Enrico, Syuto Tamura, Takashi Tani, Tokuyuki Teraji, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Liam P. McGuinness, Lachlan Rogers, Boris Naydenov, Fedor Jelezko and Junichi Isoya, Metrology of single atom control for quantum processing in silicon and diamond, 16th Takayanagi Keijiro Memorial Symposium (招待講演), 2014年11月11日, Research Institute of Electronics, Shizuoka Univ., Hamamatsu, Japan
- [20] Takahiro Shinada, Prati Enrico, Syuto Tamura, Takashi Tani, Tokuyuki Teraji, Shinobu Onoda, Takeshi Ohshima, Liam P. McGuinness, Lachlan Rogers, Boris Naydenov, Fedor Jelezko and Junichi Isoya, Opportunity of single atom control for quantum processing in silicon and diamond, 2014 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop(招待講演), 2014年06月18日, Hilton Hawaiian Village, Hawaii, USA
- [21] K. Inoue, H. Takamizawa, Y. Shimizu, B. Han, Y. Nagai, F. Yano, Y. Kunimune, M. Inoue and A. Nishida, Dopant Drive-in Path Analysis in Poly-silicon Filled in Trench type 3D-MOSFET using Atom Probe Tomography, 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2014) (招待講演), 2014年09月10日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
- [22] 田村 崇人, 小池 悟大, 谷井 孝至, 寺地 徳之, 小野田 忍, 大島 武, Fedor Jelezko, E Wu, 品田 賢宏, 磯谷 順一, Liam P. McGuinness, Lachlan Rogers, Christoph Muller, Boris Naydenov, Liu Yan, ダイヤモンドへの低エネルギー Si イオン注入における Si-V センタ生成収率の評価, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(招待講演), 2014年09月17日, 北海道大学 札幌キャンパス(札幌)
- [23] 熊谷 国憲, Prati, Enrico, 堀 匡寛, 福井 結子, 谷井 孝至, 品田 賢宏, 1次元リン(P)ドーパント配列を有する長チャネルトランジスタの低温伝導特性評価, 2014年応用物理学会春季学術講演会, 2014年03月18日, 青山学院大学(神奈川)
- [24] 品田 賢宏, 単一原子制御への挑戦 - ERM 決定論的 (Deterministic) ドーピングのご紹介 -, 2014 STRJ ワークショ

- ップ(招待講演) 2014年03月07日、
コクヨホール(東京)
- [25] 品田 賢宏、Prati, Enrico、磯谷順一、
Deterministic doping for silicon and
diamond nanoelectronics、15th
International Symposium on Ultrafast
Phenomena in Semiconductors(招待講
演) 2013年08月27日、hotel Europa
City Vilnius (Lithuania)
- [26] 田村崇人、小松原彰、寺地徳之、小野田
忍、McGuinness, Liam、Jelezko, Fedor、
Rogers, Lachlan、Jahnke, Kay、大島
武、磯谷順一、品田 賢宏、谷井孝至、
Fabrication of Silicon-Vacancy Center
Array in Diamond by Low-Energy Ion
Implantation、2013 JSAP-MRS Joint
Symposia、2013年09月20日、立命館
大学(京都)
- [27] 品田 賢宏、田村崇人、谷井孝至、小野
田忍、大島 武、寺地徳之、McGuinness,
Liam、Rogers, L.、Jahnke, K.、Jelezko,
Fedor、磯谷順一、Deterministic doping
method and the potential for diamond
application、Workshop on Strategic
Japanese Croatian Cooperative
Program(招待講演) 2013年11月15
日、東大寺文化センター(奈良)

6. 研究組織

(1)研究代表者

品田 賢宏 (SHINADA, Takahiro)
東北大学国際集積エレクトロニクス研究
開発センター・教授
研究者番号: 30329099

(2)研究分担者

谷井 孝至 (TANII Takashi)
早稲田大学理工学術院・教授
研究者番号: 20339708

井上 耕治 (INOUE Koji)
東北大学金属材料研究所・准教授
研究者番号: 50344718

(3)連携研究者

田部 道治 (TABE Michiharu)
静岡大学電子工学研究所・教授
研究者番号: 80262799

磯谷 順一 (ISOYA Junichi)
筑波大学・名誉教授
研究者番号: 600011756