

1. 研究の目的

本研究の目的は、シリコン量子ドット構造中の電子1個や電子のスピンを利用して情報処理の機能を生み出す新原理デバイスの開発を行うことである。将来的に既存のシリコンテクノロジーと量子情報処理やスピントロニクスとの融合に繋がり、デバイスの高性能化と低消費電力化を両立させることができる。また、本研究で開発するシリコン量子ドットデバイスは、周囲の電荷やスピンの変化に敏感であり、高感度センサーとして動作できる。生体分子の結合を高感度に検出できる「バイオセンサー」や、生体分子を電気検出できる「バイオトランジスタ」などへの応用も期待される。

これまで集積回路に使用されてきたトランジスタとは異なり、電子1個や電子のスピンにより動作する新原理デバイスが注目を集めている。電子1個の有無によりデジタル論理やメモリを実現する素子は単電子デバイスと呼ばれる。単電子デバイスにより集積回路を作ることができれば、従来と比較して消費電力を大幅に抑制できると言われている。また、電子のもつ性質のうち、電荷は移動させずにスピンのみを移動させることができ、ジュール熱が発生しない省エネルギー情報伝送を行えることが近年わかってきた。さらに、電子の量子力学的性質を情報処理に利用した量子情報処理が実現されれば、スーパーコンピュータでも解けないような計算を短時間で解くことができると言われ、究極の超高速計算機として期待されている。

本研究では、電子1個を3次元全ての方向からナノメートル領域に閉じ込めるシリコン量子ドットを実現する。これを用いて、上記のような新原理情報デバイスの実現を目指す。さらに、電子1個や電子スピン1つを扱えるシリコン量子ドットは、周囲の電荷やスピンの変化に高感度に反応する性質を有する。この性質を活かして、バイオセンサーやバイオトランジスタなど、医療分野・生物学分野においても有用なデバイスの実現に向けて基盤技術の開発を行った。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

(2-1) 電子1個を閉じ込めたシリコン量子ドットと高感度電荷センサーの実現

スピン情報素子の重要な構成要素として、電子1個を閉じ込めたシリコン量子ドットの作製と高感度電荷センサーの実現に成功した。

シリコン基板を用いて並列結合したシリコン量子ドットの作製を行った。素子は、図1の電子顕微鏡写真に示すような構造からなる。すなわち量子ドット(QD1)とその近傍に配置した量子ドット(QD2)からなり、サイドゲート(G1, G2)によりQD1とQD2のポテンシャルを制御できる。模式的に点線の四角形で示すように、トップゲート(TG)が形成されており、非ドーパのシリコン基板に電子を誘起するために用いられる。

サイドゲート電圧 V_{G1} を掃引して、QD2に流れる電流 I_{D2} を測定した結果、複数のクーロンピーク及びそれに重畳したキックが観測された。このキックは、QD1内の電子数が変化することにより、QD2に働く静電相互作用が変化したことを反映している。すなわち、QD1の電子数が1つだけ変化したことを、近傍に配置した電荷センサー(QD2)により検出することができたことを意味する。さらに、 V_{G1} の値がある値よりも負の電圧では、キックが観測されなくなることがわかった。その電圧領域では、QD1内の電子数が変化せず一定であることを示しており、これは電子が全く存在しない状態であると考えられる。本研究により、シリコン量子ドットにおいて少数電子状態を実現し、近傍に配置した電荷検出計による読み出しに成功した。この結果は、スピン情報素子のみならず、バイオセンサーやバイオトランジスタなどにおいても有用な基盤技術となる。

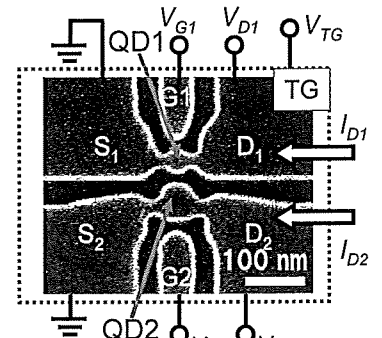


図1：少数電子状態を実現した量子ドット構造の電子顕微鏡写真

2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です。)

(2-2) 電荷検出機能とゲーティング機能を有する単一量子ドットの動作実証

直列結合したシリコン 2 重量子ドットの近傍に電荷センサーとして単一量子ドットを配置した構造を実現した。その素子を用いて、単一量子ドットに対して電荷検出機能とゲーティング機能の2つの役割を持たせる技術の開発・動作実証に成功した。将来のスピ情報素子集積化に向けた要素技術となる。

直列結合したシリコン 2 重量子ドット(DQD)の近傍に電荷センサーとして単一量子ドット(CS)を配置した構造の電子顕微鏡像を図3に示す。シリコン基板(Silicon on Insulator)に電子線リソグラフィ、エッチング、熱酸化を行うことによってDQD及びCSを形成した。シリコン層の電子は素子表面のバックゲート電極に正の電圧を印加することによって誘起される。

G_l, G_r の電圧(V_{gl}, V_{gr})を掃引して、CS の微分コンダクタンスを測定した結果を図4(a)に示す。CS 自体のクーロン振動に重畳して、コンダクタンスの急峻な変化が観測されている。急峻な変化を示す線は、DQD の電荷安定状態図に特徴的なハニカム形状となっており、DQD 内の電子数(N, M)が変化することによる信号であることがわかる。これにより、DQD の近傍に配置したCSによる電荷検出実験に成功したといえる。

ゲート電圧(V_{gl}, V_{gr})を同時に掃引し、DQD の電流値を測定した結果を図4(b)に示す。CS のソース電極及びドレイン電極に印加する電圧 V_{o1} をパラメータとして変化させている。DQD のクーロンピークが V_{o1} の印加とともにシフトする様子が観測されている。この結果は、CS のソース電極及びドレイン電極に印加する電圧 V_{o1} により、DQD のポテンシャルを制御できていることを示している。すなわち、CS に DQD に対するゲーティング機能を持たせることができた。

以上から、単一量子ドットに対して電荷検出機能とゲーティング機能の2つの役割を持たせる技術の開発・動作実証を行い、スピ情報素子集積化につながる技術開発に成功した。

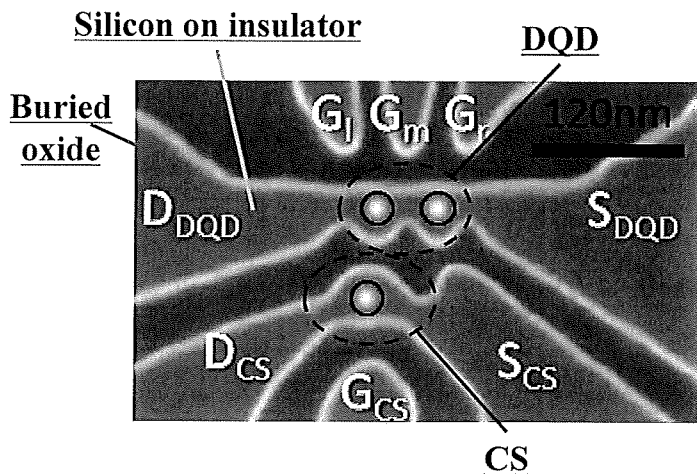
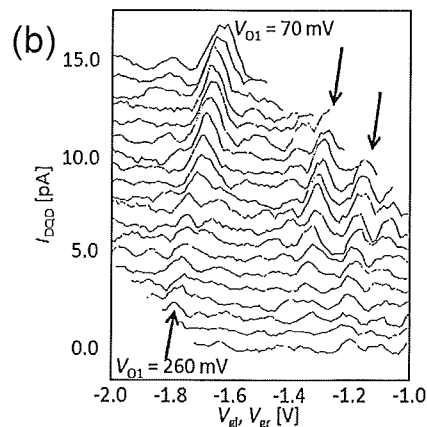
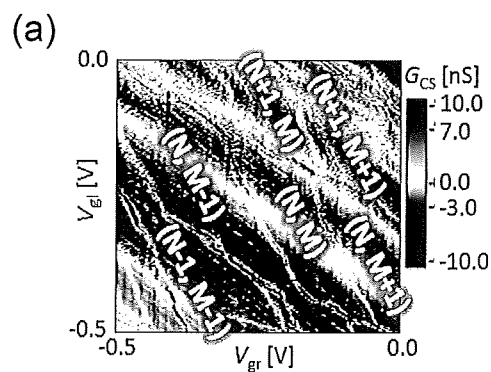


図3 (上図) : 直列結合したシリコン 2 重量子ドット(DQD)の近傍に電荷センサー(CS)を配置した構造の電子顕微鏡写真

図4 (右図) : (a)電荷センサーの微分コンダクタンスに表れる2重量子ドット内電子数の変化 (b)電荷センサーに印加する電圧によるクーロンピークのシフト



3. 研究の結論、今後の課題

本研究では、電子1個を3次元全ての方向からナノメートル領域に閉じ込めるシリコン量子ドットを実現した。さらに、電子数1個の変化を高感度に検出する電荷センサーの動作実証にも成功した。この結果は、スピン情報素子のみならず、バイオセンサーやバイオトランジスタなどにおいても有用な基盤技術となる。さらに、直列に2つ並んだシリコン量子ドットの近傍に電荷センサーとして単一量子ドットを配置した構造を用いて、単一量子ドットに対して電荷検出機能とゲーティング機能の2つの役割を持たせる技術の開発・動作実証に成功した。将来の素子集積化に向けた要素技術となる。

今後の課題としては、電子のもつ性質のうち、電荷だけではなくスピンの状態も制御する機構を作り込み、スピン情報素子の実現を進めていく必要がある。既にスピン状態に依存するトンネル現象の観測や、2電子スピン状態の制御についても予備的な実験に成功している。これらの実験を本格化させ、究極の計算機と言われる量子コンピュータの基本単位である量子ビットを実現していきたい。また、高感度センサーの応用としては、生体分子の結合を高感度に検出できる「バイオセンサー」や、生体分子を電気検出できる「バイオトランジスタ」などが期待される。これらの実現には室温で動作させる必要があり、そのためには直径が数 nm 程度のシリコン量子ドットを作製する必要がある。本研究で得られた技術の改良をさらに推し進めると同時に、ボトムアップ微細構造形成技術の融合も行い、必要となる素子構造の実現を目指したい。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いてください。)

1. 社会的価値

本研究は、新原理に基づく革新的な超低消費電力情報処理という新技術の創製に繋がる。近年、電子デバイスの高性能化と低消費電力化を両立させるグリーンテクノロジーを開発することが喫緊の課題となっている。本成果により得られた新技術により、量子情報処理素子の実現、スピントロニクス of 進展など、幅広く応用が可能である。さらに量子ドットを用いた本素子は、高感度センサーとして動作させることができ、生体分子の特異的結合を高感度に検出できる「バイオセンサー」や、生体分子を非標識に電気検出できる「バイオトランジスタ」など、医療分野・生物学分野への応用も期待される。また微小なスピン間相互作用を検出できることから、生体磁気計測、磁気共鳴画像 (MRI) 技術などの改良へも発展させられる可能性があり、生体医工学分野や脳科学の進展にも貢献できる。

2. 学術的価値

本研究では、1つの電子を閉じ込めたシリコン量子ドットを実現した。これにより、まだ詳細が理解されていないシリコン量子ドット内の電子状態について、軌道状態、バレー状態、スピン状態も含めて、正確に決定することができ、低次元半導体の物理について重要な知見が得られる。特に、バレー状態とスピン状態の関与したトンネル現象については、シリコン特有の効果であり、未開拓な学問領域である。このような現象を解明するために最も適した素子構造を本研究では実現しており、この素子を用いることで今後さらなる新しい物理の発見や解明を行える。また、本研究は、シリコン量子ドットを用いた電子スピン量子ビットの実現に繋がる研究であり、量子物理学、ナノデバイス物理学、情報科学の発展に寄与することができ、学術的意義が大きい。

3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いてください。未発表のものは公表予定を書いてください。)

学術論文:計4件、Corresponding Author

K. Horibe, **T. Kodera**, T. Kambara, K. Uchida, and S. Oda, “Key capacitive parameters for designing single-electron transistor charge sensors”, J. Appl. Phys. **111**, 093715-1-5 (2012)

T. Kambara, **T. Kodera**, Y. Arakawa, and S. Oda, “Dual Function of Single Electron Transistor Coupled with Double Quantum Dot: Gating and Charge Sensing” Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 04CJ01 他。

国際会議論文:計21件

T. Kodera, Y. Fukuoka, K. Takeda, T. Obata, K. Yoshida, K. Sawano, K. Uchida, Y. Shiraki, S. Tarucha, and S. Oda, “Fabrication and characterization of Si/SiGe quantum dots with capping gate” The 2012 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2012), June 2012, Honolulu, Hawaii

T. Kodera, T. Sawada, K. Horibe, T. Ferrus, D. Williams, M. Hatano, and S. Oda, “Top-down and bottom-up silicon quantum dots for qubit application”, Quantum Dot Day 2013, O14, University of Nottingham, UK (2013)

T. Kodera, K. Horibe, T. Kambara, T. Sawada, K. Uchida, Y. Arakawa, and S. Oda, “Fabrication and characterization of silicon quantum dots toward spin-based quantum information devices”, Internatinal Workshop on silicon Quantum Electronics, P31, Villard-deLans, France (2013) 他。

受賞:計2件

Best Poster Award, 8th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC8), “Silicon quantum dot devices toward electron spin quantum bits”, (2012) 他。