HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	パターン依存酸化法と再酸化で作製したシリコンマルチ結合量子ドットに関する研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	内田, 貴史
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12626号
Issue Date	2017-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/65486
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Takafumi_Uchida_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　内田　貴史

審査担当者　主　査　教　授　葛西 誠也
副　査　教　授　富田 章久
副　査　准教授　有田 正志

学位論文題名

パターン依存酸化法と再酸化で作製したシリコンマルチ結合量子ドットに関する研究
（Silicon multiple-coupled-quantum dots fabricated by pattern-dependent oxidation and additional oxidation）

半導体デバイスのスケーリングに関するムーアの法則に従い進展してきた LSI の高速動作化・低消費電力化・小型化という全てが良くなるシナリオは、各種の物理的限界などにより岐路に立っている。特に、消費電力の増大は、人類の将来の継続的な発展にとって致命的な問題となる。微細化に頼るトランジスタの集積化に代わる、新たな機能が求められ、新規デバイスの研究が盛んに行われている。その新規デバイスの 1 つに、量子ドットを用いた単電子トランジスタ (single-electron transistor: SET) がある。

量子ドットがトンネルバリアを介し、ソース・ドレイン電極間に存在する構造を持った SET は、量子ドット中の離散化されたエネルギー準位を用いることで、ゲート電圧で電子 1 個を制御できる。従来のトランジスタに比べ、低消費電力化・微細化が可能で、電子 1 個を制御できるという特性から標準電流や量子ビットへの応用に向けた研究も行われている。これらの応用は、全て、連結した結合量子ドットが用いられる。特に、量子ドット応用では、スピン緩和時間の長い Si 量子ドット中の電子スピンを用いたスピン量子ビットが注目されており、電場や磁場を用いたスピン制御に関する研究は数多くされている。しかし、単体ビットから数ビットでの検討であり、Si 量子ドットの高集積化に向けた研究はほとんどない。また、極低温のミリ K での物理的検討がなされているのみで、動作温度向上に向けてのドットサイズのさらなる縮小の検討もなされていない。

このような視点に立ち、本研究では、電流標準の構築や量子ビットの実現へ向け、高集積化を念頭に置いた新たな Si マルチ結合量子ドットの作製法の確立を目指している。作製手法として、パターン依存酸化法を用いて Si 細線中に単一量子ドットを形成し、その後、細線上に 2 本の微細ゲート電極を取付け再酸化することで、二重結合量子ドットが形成できること、量子ビットでは重要となるドット間の結合容量がドット中の電子数を変えることで制御できることを示している。次に、ドットの集積化へ向けて、3 本の微細ゲートを取付けることで三重結合量子ドットが形成できることを明らかにしている。この結果から、細線上の微細ゲート数を増加することで、量子ドットの数を増やすことが可能となり、集積化が可能であることを示された。Si 細線の酸化という簡易な手法を用いているので、現行の CMOS プロセスと整合し、ドットの高集積化・微細化が期待できる。最後に、ドットを高集積化した際の三重結合量子ドットの新たな評価法を提案し、ゲート電極とドット間の結合容量の評価を実現している。これらの結果から、簡易な高集積 Si 量子ドットデバイスの作製法と評価法を確立したと言える。

以下に本論文における各章の概要を述べる。

第 1 章は序章であり、研究背景および研究目的について述べている。本研究で注目した SET について説明し、二重量子ドットデバイスとその応用に関してまとめている。

第 2 章では、少数電子系 Si-SET を用いた研究結果について述べている。パターン依存酸化法を用いて作製した 2 ゲート Si-SET では、少数電子系において Si 量子ドット中の電子数が増加することで、電極とドット間の結合容量が不規則に変化することを明らかにし、この結果から、電子数によって実効的な量子ドットの形状が変化していることが示唆している。この現象は結合量子ドットにも大きく影響を与え、次章に述べる研究に発展させている。

第 3 章では、二重結合量子ドットの作製法と評価方法について述べている。これまでの Si-SET の作製法に工夫を加え、微細ゲート電極を細線上に 2 本取付け、再酸化することで、各微細ゲート直下に量子ドットが形成できることを示している。加えて、少数電子系においては、電子数によってドット間の結合を制御できることを明らかにしている。

第 4 章では、微細ゲートを 3 本取付けることで、三重結合量子ドットが形成できることを明らかにし、微細ゲート数を増やすことで結合量子ドット数を増加できることを示している。また、ゲート容量から作製したドットの形状に関して考察している。

第 5 章では、デバイス構造をより微細化した際の三重結合量子ドットにおいて、ゲート容量評価が複雑化する問題点に対し、同時スイープ法という新たな手法を提案し、シミュレーションを用いてその有用性を示している。そして、実際に微細化した三重結合量子ドットを作製し、同時スイープ法を用いて評価を行い、手法の妥当性を確認している。

第 6 章では、総括について述べている。

これを要するに、著者は、Si 結合量子ドットを作製する簡易で効果的な手法を提案し、その手法で作製された二重、三重結合量子ドットを電気的特性から確認・実証している。複雑になる三重結合量子ドットの比較的簡易な解析手法も構築しており、作製法と評価法の双方の面で今後の新機能素子の開拓に向けての基礎を築いたといえる。これらの技術と知見は半導体デバイス工学の進歩に貢献するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。