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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　内田　貴史

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）

これまでの情報処理技術は、ムーアの法則に従いトランジスタのスケーリングにより、LSI の高速動作・低消費電力化・小型化を実現することで発展してきた。しかし近年、トランジスタの微細化に伴うリーク電流による発熱や特性のばらつき、微細化の物理的限界などが問題となり、ムーアの法則が成り立たなくなると言われている。そこで、トランジスタに代わる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、単電子トランジスタ (single-electron transistor: SET) がある。

SET は、トランジスタと同じように、ソース・ドレイン・ゲートの電極があり、クーロン島と呼ばれ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となっている。この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・微細化が可能なため、新規デバイスとして注目されている。さらに、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。これらの応用には、ソース・ドレイン間に量子ドットを集積し、それぞれのドット中の電子数を制御する必要がある。現在、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、Si 量子ドットの高集積化に向けた研究は少なく、ドットサイズもさらに小さくすることで動作温度を上げなければならないという課題もある。

本研究では、標準電流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、作製された量子ドットの評価を行った。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度酸化することで、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た。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た。この結果から、細線上の微細ゲート数を増加することで、量子ドットの集積化が可能であることを示した。この作製法では、Si 細線を酸化するという簡易な手法を用いているので、現行の CMOS プロセスを適応することができ、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を評価する簡易な手法を確立した。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。

第一章は序章であり、研究背景および研究目的について述べる。本研究で注目した SET について説明する。また、二重量子ドットデバイスとその応用に関してまとめる。

第二章では、少数電子系 Si-SET を用いた研究結果について述べる。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た。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される。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した。

第三章では、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た。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た。

第四章では、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た。また、ゲート容量から作製したドットの形状に関する考察を行った。

第五章では、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た。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た。

第六章では、総括について述べる。