

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04635

研究課題名（和文）半導体量子ビット設計シミュレータQCADの開発

研究課題名（英文）Development of QCAD simulator for semiconductor qubit design

研究代表者

浅井 栄大（ASAI, Hidehiro）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：00722290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：半導体量子コンピュータの実用化に向けて、半導体量子ビットの設計シミュレーションツール（QCAD）の開発を行なった。QCADは1量子ビットまたは2量子ビット構造とその動作条件を入力する事で、電荷安定図やRabi振動に代表される量子ビットの基本特性を出力することができる。また、開発したQCADを用いて、量子ビットの大規模集積化の際の大きな課題となる「特性ばらつき」の問題に取り組み、ばらつきを抑制する新量子ビット構造の提案を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では量子コンピュータの設計ツールを開発しており、本成果は国産半導体量子コンピュータ開発を強く支援するものとなっている。そのため、本研究成果は量子コンピュータ開発における日本のプレゼンスを高める上で重要な成果となる。また、本研究では「量子ビット集積デバイス工学」を新たに切り拓いており、電子デバイス工学及び量子情報科学、更には物性物理分野においても重要な学術研究となっている。

研究成果の概要（英文）：We have developed a simulator for semiconductor qubit design (QCAD) for the practical application of semiconductor qubits, which can output the fundamental properties of a qubit, such as charge stability diagram and Rabi oscillation, by inputting a single-qubit or two-qubit structure and its operating conditions. Using the developed QCAD, we tackled the problem of the characteristic variation, which is a major issue in the large-scale integration of qubits, and proposed a new qubit structure that suppresses the variation.

研究分野：半導体デバイス工学、計算物理学、超伝導デバイス工学

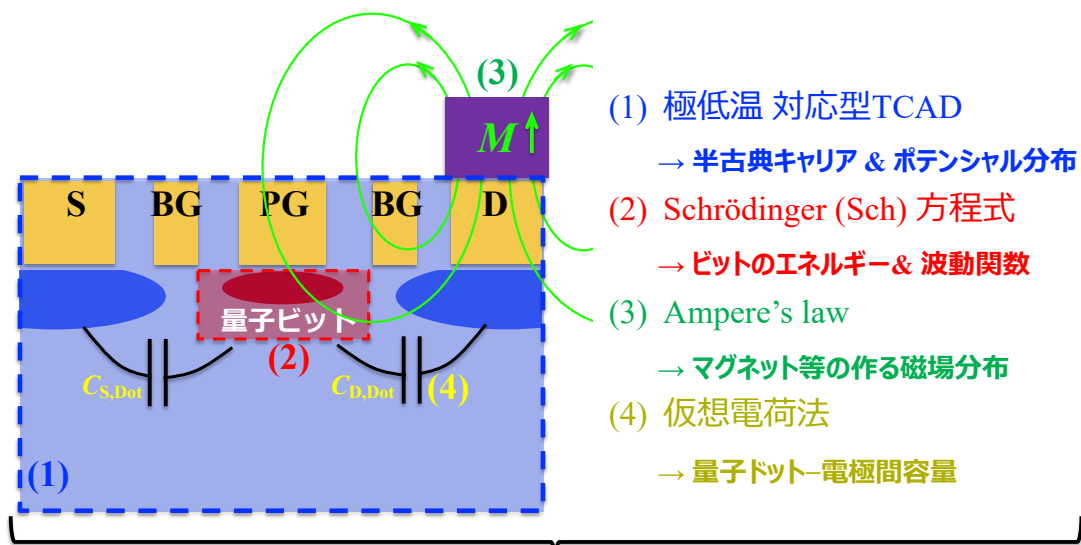
キーワード：半導体量子ビットシミュレータ TCAD QCAD

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータはビット間の量子もつれ状態を利用する事で超並列計算が実現できる新原理デバイスであり、その実現は電子デバイス工学及び量子情報科学、更には物性物理分野にも跨る幅広い学術的課題となっている。近年、量子コンピュータの大規模集積化の観点から、数十nmスケールの半導体型量子ビットを利用した半導体量子コンピュータが注目を集めており、大手半導体素子メーカーを含めた産学官連携による研究が急速に進展している。しかし、現在の開発の現場では半導体量子ビットの集積化に向けた「量子ビット設計シミュレータ」が存在せず、経験則的設計に頼らざるを得ない状況となっている。そのため、半導体量子ビット設計を支援するためのシミュレータの開発が、実用的な半導体量子コンピュータ実現の鍵となっている。

2. 研究の目的

従来の半導体素子の集積化に向けた開発では、設計ツールであるTCAD (Technology Computer Aided Design) シミュレータを援用した単一素子の動作解析及び最適設計が大きな役割を果たしている。本研究では、TCAD シミュレーション手法と量子ビットの理論解析手法とを融合する事で「半導体量子ビットシミュレータ(QCAD)」を開発し、量子ビットの動作解析及び設計支援を行う環境を構築する。QCADを用いた量子ビット素子の設計手法を確立する事で、高集積半導体量子コンピュータ実用化に向けた研究を大きく進展させる事を旨すとともに、量子ビットの集積デバイス工学の分野を開拓する事を志す。



量子ビットデバイスの基本情報

(半導体キャリア・ポテンシャル・磁場分布、量子ビットの波動関数・固有エネルギー等)

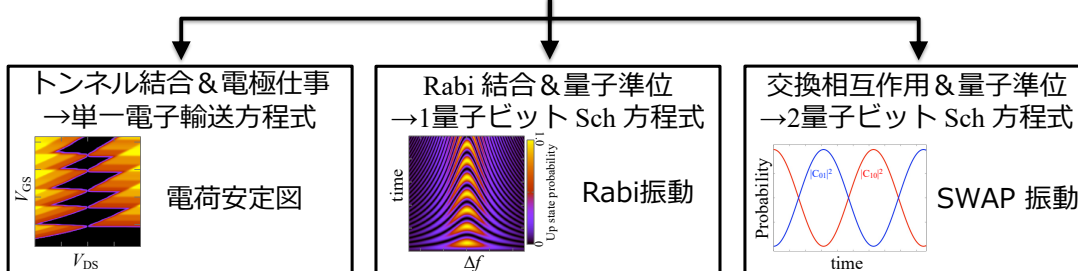


図1：半導体量子ビットシミュレータの概要

### 3. 研究の方法

TCAD はキャリア電流連続の式とポアソン方程式に立脚したシミュレータであり、デバイス内部のキャリア分布やポテンシャル分布を計算する事で、従来の半導体素子の動作特性を精度よく再現する事ができる。しかし、「量子重ね合わせ」や「量子もつれ」のような非古典的な量子ビットの特性を原理上扱うことができない。一方、量子ビットの理論解析においては量子マスター方程式による解析手法が確立されている。しかしこれらの解析では、量子ビット領域をとりまくデバイス構造の存在が陽に扱われていない。QCAD は両者の手法を融合する事で、デバイス構造の入力から量子ビット状態に関する出力まで一貫して整合性のとれたシミュレーションを実現する。

### 4. 研究成果

研究期間の前半では、まず1量子ビットのシミュレーション技術の開発に専念した。量子ビット構造及び動作条件の入力から1量子ビットの電荷安定図とRabi振動を同時にシミュレーションする事を世界で初めて成功し、国際会議にて発表を行なった (EDTM 2021 Best paper award 獲得)。その後、2量子ビット系へ対応可能な形にシミュレーション技術を拡張するとともに、QCADシミュレータとして整備を進めた。開発したQCADの概要を図1に示す。QCAD では、量子ビット領域における Schrödinger 方程式と量子ビット領域をとりまくデバイス構造における半古典キャリアの輸送方程式と電磁場の方程式を自己無撞着に解く。その計算結果から、量子ビット準位、ビット/電極間のトンネル結合、印加電磁場との相互作用エネルギー等、量子ビットゲート操作の基本となる物理量を抽出する。以上の結果を基に量子ビット系の多体のSchrödinger方程式を解き、量子ビットの構造及び動作条件の入力から電荷安定図やRabi振動のような量子ビット基本特性のシミュレーションを実現する。

研究期間の後半では、開発したQCADを用いて量子ビット特性のばらつきの問題に取り組んだ。従来の半導体集積デバイスと同様、寸法・形状の変動等に起因する量子ビット特性のばらつきは大規模集積化を妨げる大きな課題となる。そこで、1量子ビット及び2量子ビットゲート操作のばらつきを抑制するための新構造をQCADシミュレーションにより提案した。図2は2量子ゲート操作のばらつきを抑制する新しい量子ビット構造を示している。シミュレーションの結果、本構造を利用する事で最大 $10^6$ ビットを超える集積が可能である事がわかり、本構造の特許出願も行なった。

以上のように、研究機関を通じて「半導体量子ビットシミュレータ(QCAD)」の開発という当初の目標を十分に達成するとともに、ばらつき抑制に向けた新量子ビット構造の提案といった新しい学術研究へ展開する事ができた。

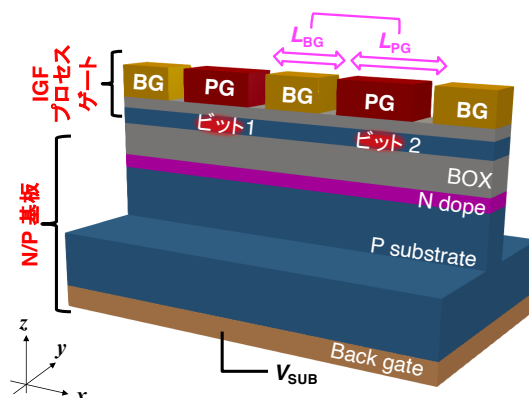


図2：提案した製造ばらつきに耐性のある2量子ビット構造の概略図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tohru Mogami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Tsutomu Ikegami, Kimihiko Kato, Hiroshi Oka and Takahiro Mori	4. 巻 62
2. 論文標題 Device structure and fabrication process for silicon spin qubit realizing process-variation-robust SWAP gate operation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1088-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acbcdd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 浅井栄大	4. 巻 229
2. 論文標題 半導体量子ビット設計に向けた量子・半古典ハイブリッドシミュレーション技術の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理学会分科会 シリコンテクノロジー	6. 最初と最後の頁 19-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tsutomu Ikegami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Hiroshi Oka, Kimihiko Kato, Hiroyuki Ota, Takahiro Mori	4. 巻 1
2. 論文標題 Development of Integrated Device Simulator for Quantum Bit Design: Self-consistent Calculation for Quantum Transport and Qubit Operation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/EDTM50988.2021.9420978	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 4件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 浅井栄大、飯塚将太、最上徹、服部淳一、福田浩一、池上努、加藤公彦、岡博史、森貴洋
2. 発表標題 TCAD技術をベースとした半導体量子ビットシミュレータの開発
3. 学会等名 超伝導エレクトロニクス研究会 1月研究会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浅井栄大、飯塚将太、最上徹、服部淳一、福田浩一、池上努、加藤公彦、岡博史、森貴洋
2. 発表標題 シリコン量子ビットの大規模集積化に向けた 量子デバイスシミュレータの開発
3. 学会等名 シリコン材料・デバイス研究会 (SDM) 11月研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidehiro Asai
2. 発表標題 Development of Quantum Device Simulator toward Large-Scale Integration of Qubits
3. 学会等名 Frontiers of Semiconductor Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tohru Mogami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Tsutomu Ikegami, Kimihiko Kato, Hiroshi Oka, and Takahiro Mori
2. 発表標題 Device Structure and Fabrication Process for Silicon Spin Qubit Realizing Process-Variation-Robust two-Qubit SWAP Gate
3. 学会等名 SSDM2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tohru Mogami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Tsutomu Ikegami, Kimihiko Kato, Hiroshi Oka, and Takahiro Mori
2. 発表標題 Device Structure and Fabrication Process for Silicon Spin Qubit Realizing Process-Variation-Robust SWAP Gate
3. 学会等名 SIQEW2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅井栄大
2. 発表標題 半導体量子ビット設計に向けた量子・半古典ハイブリッドシミュレーション技術の開発
3. 学会等名 応物シリコンテクノロジー分科会 第229回研究集会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲葉工、浅井栄大、他
2. 発表標題 極低温動作MOSFETにおけるDIBL-likeなId-Vg特性の原因
3. 学会等名 第69回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tsutomu Ikegami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Hiroshi Oka, Kimihiko Kato, Hiroyuki Ota, Takahiro Mori
2. 発表標題 Development of Integrated Device Simulator for Quantum Bit Design: Self-consistent Calculation for Quantum Transport and Qubit Operation
3. 学会等名 5th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM) (国際学会)
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 浅井栄大、飯塚将太、池上努、服部淳一、福田浩一、岡博史、加藤公彦、太田裕之、森貴洋
2. 発表標題 TCAD 技術を活用した半導体量子ビットシミュレータの開発
3. 学会等名 第68回日本応用物理学会春季大会
4. 発表年 2020年~2021年

1. 発表者名 Hidehiro Asai, Shota Iizuka, Tsutomu Ikegami, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, Hiroshi Oka, Kimihiko Kato, Hiroyuki Ota, Takahiro Mori
2. 発表標題 Development of integrated device simulator for Silicon Quantum Bit Design
3. 学会等名 American Physical Society March meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------