

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	スピン系量子情報デバイスを目指した電荷センサ集積シリコン 2 重量子ドットデバイスに関する研究
Title(English)	Silicon double quantum dots with charge sensors for spin-based quantum information devices
著者(和文)	蒲原知宏
Author(English)	Tomohiro Kambara
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9456号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小田 俊理,波多野 睦子,浅田 雅洋,宮本 恭幸,河野 行雄, 水田 博
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9456号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	電子物理工学	専攻	申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Department of			Academic Degree Requested	Doctor of	
学生氏名：	蒲原知宏		指導教員 (主)：	小田俊理	
Student's Name			Academic Advisor(main)		
			指導教員 (副)：		
			Academic Advisor(sub)		

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

論文題目：Silicon double quantum dots with charge sensors for spin-based quantum information devices (スピン系量子情報デバイスを目指した電荷センサ集積シリコン2重量子ドットデバイスに関する研究)

論文目的：シリコン中の電子スピンを用いた量子情報処理素子実現に向け、1. 単一量子ビット、及び将来の量子ビット集積化に適したデバイス構造の開発、2. 1を満たすデバイス構造を用いた、電子スピン共鳴法を用いた電子スピンの制御、の2点を目的とする。

論文結論：1. シリコン単電子トランジスタに電荷検出機能、及びゲーティング機能を同時に持たせることに成功した。この結果、空間的に集積が難しかった量子ドットデバイスの拡張が可能になった。2. 1. のデバイス構造に強磁性体を集積し、磁場及び高周波を印加することで、電子スピン共鳴とみられる現象を観測した。この結果、当該構造で電子スピンの制御が可能であることを示し、コヒーレンス時間の見積もりも行った。

論文構成：

「第1章 序論」では、新しいアーキテクチャにより動作する情報処理素子である量子コンピュータについて、特に半導体中の電荷量子ビット、電子スピン量子ビットの研究背景、及び近年の世界的な研究状況について説明している。また、本論文の構成と研究目的について述べている。

「第2章 量子ドットデバイス中の電子輸送理論」では、本論文で測定している量子ドット中の電子輸送、及び電子スピン共鳴の理論を述べている。具体的には、導体の多体系における各導体を持つ静電エネルギーの導出と、電子がポテンシャル障壁を通り抜ける単電子トンネリングや、これを発展させた単一量子ドット及び2重結合量子ドット構造における静電エネルギー、電子スピン共鳴の原理を説明している。

「第3章 実験技術」では、本論文の量子ドット構造の作製に使用した装置、設備について述べている。半導体、特にシリコンを用いた量子ドットなどのナノ構造では、その作製に使用する設備のクリーン度やサンプルの取り扱い方が、極低温における電子輸送の特性に多大な影響を与える。そのため、本論文で行うサンプル作製の詳しい作製手順についても説明している。

「第4章 シリコン2重結合量子ドット中の電荷状態解析」では、電子線リソグラフィとドライエッチングにより作製される2重結合量子ドット中の電荷状態について、3次元デバイスシミュレータを用いて解析を行なわれ、各ゲート電圧により量子ドット中に電子が閉じ込められることが確認されている。極低温における電子密度を、100Kにおける計算結果と、それらの温度におけるMOSFETの電子密度測定結果を用いて見積もっている。各ゲート電圧を調整することで本デバイス構造で単一電子の閉じ込めが可能になることが示唆されたが、一方でトンネルレートの低下によるソース・ドレイン電流値の減少も考えられることから、2重結合量子ドット中の電荷状態を読み出すための電荷センサを集積した構造についても述べている。

「第5章 多種シリコン2重結合量子ドット構造における単電子輸送の検出」では、第5章で解析したシリコン2重結合量子ドット近傍に電荷センサとして単一量子ドットを集積し、この構造において初めて左右量子ドット間の単電子輸送を検出している。また2重結合量子ドットデバイスの構造について、電子スピン量子ビットに向け、バックゲート電圧による電荷誘起、及び電子トンネリングレート向上に向けた量子ドット間くびれ位置の検討も行なっている。

「第6章 電荷センサの2重機能性：電荷検出とゲーティング機能」では、本研究で用いているシリコン量子ドットの2重機能性を開発している。2重結合量子ドット近傍に集積した電荷センサは、そのソース・ドレイン端子両方に電圧を印加することで、電荷センサのセンシング機能に加え、2重結合量子ドットに対するゲート端子としても機能することが初めて示されている。特に本研究の量子ドットデバイスでは各量子ドット・ゲート端子がドライエッチングにより分離されているため、量子ドット間の電流リークが起きにくいという長所があり、本デバイス構造の大きな利点となっている。

「第7章 シリコン2重結合量子ドットと強磁性体を用いた電子スピン共鳴の解析」では、2重結合量子ドット中の単電子スピンを制御するためにその近傍に集積した強磁性体微細構造による局所磁場を解析している。これまでに実現されている、磁性体を用いた電子スピン共鳴に比べ、本デバイス構造では10倍程度の速度で電子スピンを回転できることが示されている。実際に強磁性体を集積したデバイスでブロック現象が観測され、その磁場依存性や高周波応答により、電子スピンのみでなく、4族半導体に特有なバレーによるブロック現象である可能性が示されている。更に特定の磁場印加によりバレーブロック現象を解除し、その磁場領域のみで電子スピン共鳴とみられる電流ピークが観測されている。また、強磁性体の形状を最適化することで、外部磁場を印加することなく、残留磁化と高周波印加によって電子スピンを制御することが可能な構造を提案している。

「第8章 結論」では、本論文のまとめについて述べている。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻：	電子物理工学	専攻
Department of		
学生氏名：	蒲原 知宏	
Student's Name		

申請学位 (専攻分野)：	博士	(工学)
Academic Degree Requested	Doctor of	
指導教員 (主)：	小田 俊理	
Academic Advisor(main)		
指導教員 (副)：		
Academic Advisor(sub)		

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Thesis title: Silicon double quantum dots with charge sensors for spin-based quantum information devices
Research purpose: Development of element technologies for Si spin qubits as follows in this work:

1. Development of the integration technology of Si QDs. Many gate electrodes and sensors should be used for one spin qubits, which becomes a problem for the integration.
2. Design the Si QDs device to develop the technology of the single electron-spin control. Especially, we focus on ESR method with RF wave which is suitable for future spin-qubits integration.

The Si QDs used in this work are defined lithographically and its shape is flexibly changed by the change of the design pattern of the lithography. For the actual quantum information processing in the future, Si spin qubits not only one qubit but also further integration of many qubits should be achieved. Therefore, development of the technology of the single electron-spin control with Si QDs fabricated by Si-MOSFET compatible process is another aim of this work.

Summary: The main results of this study can be summarized as follows:

1. Develop the Si coupled QDs device for single spin qubit and its integration
2. Design and fabricate the Si DQD for ESR and observe blockade region

About the 1st result, the single-electron transition in the DQD is actually measured by the transconductance of the CS. The gating function of the CS with its charge sensing function is also developed.

About the 2nd result, 7 MHz Rabi frequency and the small difference of the RF frequency for the resonance in the left and right QD are calculated. From the measurement of the DQD device with ferromagnet, the blockade region in several bias triangles is observed. By applying RF to the gate electrode with a certain magnetic field, distant current peaks are observed. The center frequency of the peaks agrees well with the expectation from the magnetic field calculation, which suggests the current peaks are by ESR.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).