

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	二重量子ドットと表面弾性波共振器を用いたハイブリッド量子系
Title(English)	Hybrid Quantum System with a Double Quantum Dot and a Surface Acoustic Wave Resonator
著者(和文)	佐藤裕也
Author(English)	Yuya Sato
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11040号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:藤澤 利正,吉野 淳二,上妻 幹旺,笹本 智弘,小寺 哲夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11040号, Conferred date:2019/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第 号			学位申請者氏名		佐藤 裕也	
論文審査 審 査 員		氏 名	職 名		氏 名	職 名	
	主査	藤澤 利正	教授	審査員	小寺 哲夫	准教授	
	審査員	吉野 淳二	教授				
		上妻 幹旺	教授				
		笹本 智弘	教授				

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は、“Hybrid Quantum System with a Double Quantum Dot and a Surface Acoustic Wave”と題し、半導体微細加工によって形成される二重量子ドットの電子系と表面弾性波のフォノン系のハイブリッド量子系に関する実験研究について述べたものである。表面弾性波共振器中の二重量子ドットという独自のハイブリッド系を提案し、半導体表面の金属パターンを形成することでハイブリッド系を実現する素子を作製し、極低温での電子輸送測定によりフォノン共振器の特性評価（４章）・フォノン支援トンネルの観測（５章）・スピン閉塞現象を用いたラビ分裂の測定（６章）などの実験に成功し、電子＋フォノンのハイブリッド量子系の発展に大きく貢献する内容となっている。博士論文は７章から構成されており、各章は以下のように要約される。

第１章 Introduction では、本研究の背景と目的について述べられている。量子情報技術への期待から、複数の量子を結合したハイブリッド量子系への期待が高まる中で、電子系とフォノン系という新しい系が注目されている。本研究では、二重量子ドットと表面弾性波フォノンのハイブリッド系に着目しており、先行研究との関連性などを概観することで本研究の独自性と位置づけを明確にしている。

第２章 Acoustic Cavity Quantum Electrodynamics (cQED)では、量子光学で培われた cQED を概観するとともに、フォトンフォノンに置き換えた Acoustic cQED の特徴について記述されている。通常の cQED では、超微細構造定数 α ($\sim 1/137$)によって結合強度に制限があることが知られている。Acoustic cQED では、フォノンの音速や電子格子相互作用の大きななどで決まる有効超微細構造定数 α_{eff} による制限があるが、物理定数 α が物質定数 α_{eff} となることで設計自由度が増し、従来にない強い結合 ($\alpha_{\text{eff}} > \alpha$) を得ることができるとしている。

第３章 Hybrid System with a DQD and a SAW では、半導体二重量子ドット(DQD)と表面弾性波(SAW)フォノンとのハイブリッド系に関する設計指針が述べられている。DQD は大きな電荷ダイポールを有する電荷量子ビットとして機能させることができ、SAW フォノンによるピエゾ電場と結合する。現実的な系を想定して、量子ビットのエネルギー・電荷ダイポール・コヒーレンス時間、フォノンのエネルギー・波長・減衰時間などを基にして、強結合領域の達成に必要な設計指針が明確に示されている。

第４章 Characteristics of Surface Acoustic Wave Devices では、SAW 共振器の設計、作製、特性評価が述べられている。半導体表面を金属などで被覆すると、音響インピーダンスの変化によって SAW の反射と速度変化が生じ、周期的金属パターンの形成でブラッグ反射鏡や共振器を設計できる。本研究目的では、速度変化が小さく反射係数が大きい材料が望ましく、GaAs 上の Ti 薄膜の形成が適していることを実験的に示した。以下の ５・６ 章の実験では、第一世代の Au 薄膜による SAW 共振器が用いられているが、Ti 薄膜による共振器に置き換えることで結合強度の増大などの発展性が期待されるとしている。

第５章 Enhanced electron-phonon coupling for a charge qubit in a surface acoustic wave resonator では、SAW 共振器中に置かれた DQD の電子輸送特性について述べられている。まず、量子ポイント接合を用いた時間分解ポテンシャル測定手法を用いて、ブラッグ反射鏡におけるフォノンバンドギャップの測定や、DQD の中心に節をもつ共振器モード（定在波）の形成を確認している。これらの結果から、共振器によって電子・フォノンの結合が約 $F=80$ 倍に増大できるとしている。実際、この共振器を用いて、フォノンの吸収・放出を伴う共鳴トンネル現象（フォノン支援トンネル）の観測に成功している。

第６章 Probing the Rabi splitting with spin-flip transition with a double quantum dot in a coherent photon/phonon fields では、スピン閉塞状態にある DQD を用いることで、スピン反転を伴うフォノン支援トンネルの観測に成功している。観測された電流ピークの条件は、SAW 励起強度に対

して非単調に変化しており、フォノンによってラビ分裂が生じ、フォノンと電子系がコヒーレントに結合していることを示している。この結果は、核スピンゆらぎによるスピン反転を考慮したモデルで説明でき、マスター方程式による解析結果とよい一致を示す。さらに、本手法によるラビ分裂の観測は、電子系の観測によるという点で興味深く、フォノンだけでなくフォトンに対しても有効であるなど適用範囲の広い観測手法であるとしている。

第7章 **Summary** では、一連の研究成果のまとめと、本ハイブリッド量子系の展望について述べられている。

また、Appendix では、SAW 共振器のモデル計算、Floquet-Lindblad マスター方程式による計算の手法について詳細に述べられている。

以上を要するに、本論文では、電子系とフォノン系によるハイブリッド量子系を提案し、実験的に実証したものであり、独創性の高い研究内容である。当該ハイブリッド量子系の研究への寄与も大きく、研究の発展性も期待される。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。