

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	量子情報処理に向けた表面弾性波駆動単一電子輸送
Title(English)	Surface Acoustic Wave-Driven Single-Electron Transport for Quantum Information Processing
著者(和文)	太田俊輔
Author(English)	Shunsuke Ota
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12697号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小寺 哲夫,波多野 睦子,若林 整,岩崎 孝之,藤澤 利正,山本 倫久
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12697号, Conferred date:2024/3/26, 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

(博士課程)

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		太田 俊輔	
論文審査 審査員		氏名	職名		氏名	職名
	主査	小寺 哲夫	准教授	審査員	藤澤 利正	教授
	審査員	波多野 睦子	教授		山本 倫久	学外審査員 (理化学研究所/ 東京大学)
		若林 整	教授			
岩崎 孝之		准教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、"Surface Acoustic Wave-Driven Single-Electron Transport for Quantum Information Processing" (量子情報処理に向けた表面弾性波駆動単一電子輸送) と題し、英文 6 章から構成されている。

第 1 章 "Introduction" (序論) では、量子情報処理デバイスを実現するためには、大規模集積された高忠実度な量子ビットの実現や、操作と読み出しの最適化など、多くのマイルストーンを達成する必要があると述べている。量子情報を長距離にわたってコヒーレントに伝達する方法も求められており、表面弾性波を用いた単一電子の輸送技術も有望視されていることを説明している。研究背景を述べた上で、これまで本技術が抱えていた課題を指摘し、この課題を解決するために本論文で行った一連の研究の目的と本論文の構成について説明している。

第 2 章 "Optimization of surface acoustic wave generation method" (表面弾性波の生成手法の最適化) では、後の章の実験に不可欠な表面弾性波の生成及びその最適化に関する 2 つの実験として、表面弾性波の生成・検出に用いるインターデジタルトランスデューサ (Interdigital transducer (IDT)) の特性の材料依存性と単一の表面弾性波パルス生成技術の開発についてまとめている。また、表面弾性波に関する技術的背景、IDT の設計と製造及び測定方法について説明している。

第 3 章 "In-flight distribution of an electron within a surface acoustic wave" (表面弾性波内での電子の飛行中における分布) では、パルス技術を用いて、表面弾性波によって運ばれる単一電子の分布情報を得ることで、表面弾性波の中で意図的に選ばれたある波の底での単一電子輸送を可能にするために行った実験について説明している。強い閉じ込め効果を持つ表面弾性波を発生させ、20 μm 離れた量子ドット間で表面弾性波を介して単一電子を輸送する際の時間飛行測定を行い、電子の位置を同定した輸送を初めて実証したと述べている。構築した測定系において達成可能な最大強度 24 meV の表面弾性波を使用した際、指定した底での電子の閉じ込め忠実度として、97±2% が得られたことを示している。この成果を受けて、以前は不可能だった複数電子の同期輸送が可能となり、2 つの量子ドットから単一電子を同期させながら輸送し、結合量子細線で衝突させ、クーロン相互作用によるアンチバンチングを観測する実験に繋がったと言及している。

第 4 章 "On-demand single-electron source using surface acoustic wave pulses" (表面弾性波パルスを用いたオンデマンド単一電子源) では、開発した単一の表面弾性波パルスと量子細線を組み合わせることで、量子ドットを用いない簡便な方法での単一電子生成を実現したと述べている。連続的に発生させた表面弾性波パルスによって量子細線で生成される単一電子を、量子化電流として観測し、オンデマンド単一電子源としての動作を実証したと説明している。この単一電子源は、任意の遅延を持ってナノ秒スケールで単一電子を生成することができることを報告している。さらに、従来必要だった量子ドットに電子を準備するための時間がかかる操作や、そのために必要な周辺構造や配線、タイミング同期のための高周波印可などが不要であることから、将来の拡張性の点で優れた単一電子源であると説明している。

第 5 章 "Suppression of electromagnetic wave by differential excitation for surface acoustic wave generation" (表面弾性波生成における差動励起による電磁波の抑制) では、単一の表面弾性波パルス実験で明らかになった電磁波クロストークの課題を解決するために、表面弾性波を生成する際に生じる不要な電磁波を低減できる IDT 差動励起法を提案し、実証した実験について説明している。本手法を用いることで、従来手法と比べて、生成される表面弾性波の強度はそのままに、電磁波の発生を 90%以上抑制することができたと説明している。従来手法では、電磁波と表面弾性波の速度の違いを利用し空間的に切り分けることで電磁波のクロストークの影響を抑えており、電磁波の発生自体は低減されないことが課題であったが、今回開発した手法では電磁波の発生そのものを低減したことで IDT の動作制限を緩和し、系を拡張する際の課題の解決策を提示したと述べている。

第 6 章 "Conclusion and perspectives" (まとめと展望) では、本論文の結論と今後の展望をまとめている。本論文で達成したそれぞれの成果が、本手法の安定性、精密性を向上させ、自由度を広げ、複数電子の輸送実験に貢献をもたらすものであると説明している。また、今後の電子飛行量子ビットによる量子コンピュータの実現に向けて直接的に重要な役割を果たすことを説明し、さらに半導体スピン量子ビットによる量子コンピュータの実現に向けて現在求められている長距離の量子情報輸送への活用という方向性を示している。

以上を要するに、本論文では、表面弾性波駆動の単一電子輸送技術がこれまで抱えていた本質的な問題を解決し、この技術を進歩させるために必須となる結果や技術が得られており、新分野を開拓する研究が行われている。以上の内容は、将来的に表面弾性波を用いた量子情報処理デバイスを実現する上で、その礎となる重要な成果であり、工学上、貢献するところが大きい。よって、我々は本論文が博士(工学)の学位論文として十分な価値があると認める。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(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。