

論文 / 著書情報

Article / Book Information

題目(和文)	電子-フォノン複合系における量子デコヒーレンスの超高速ダイナミクス
Title(English)	Ultrafast dynamics of quantum decoherence in an electron-phonon composite system
著者(和文)	高木一旗
Author(English)	Itsuki Takagi
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12653号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中村 一隆,笹川 崇男,川路 均,松田 晃史,三宮 工
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12653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		高木一旗	
論文審査 審査員		氏 名		職 名		氏 名	職 名
	主査	中村一隆		准教授	審査員	三宮 工	准教授
	審査員	笹川崇男		准教授			
		川路 均		教授			
		松田晃史		准教授			

論文審査の要旨（2000 字程度）

本博士論文は、「Ultrafast dynamics of quantum decoherence in an electron-phonon composite system（電子-フォノン複合系における量子デコヒーレンスの超高速ダイナミクス）」と題し、全六章で構成され、全編英文で書かれている。

第一章「Introduction」では、本論文の背景と目的について述べている。量子コヒーレンスは、量子力学特有の性質であり、量子状態間の重ね合わせを可能にする。固体物質では、量子自由度が非常に大きいため、環境との相互作用によって量子コヒーレンスが急速に失われる。特に、バンド間遷移した電子状態のコヒーレンスは、アト秒から数フェムト秒という非常に速い現象であり、デコヒーレンス時間やデコヒーレンス過程についてはよく分かっていない。これまでの研究では、相対位相制御されたフェムト秒パルス対を用いた量子経路干渉法により、GaAs 中の電子コヒーレンスに伴う干渉をアト秒精度で観測することに成功している。しかしながら、その干渉の特異性からデコヒーレンス評価は極めて困難であり、定量評価法の確立などが大きな課題となっている。これらの背景を踏まえて、本論文では、電子フォノン複合系における電子デコヒーレンス時間およびデコヒーレンス過程を明らかにすることを目的としている。

第二章「Theory for coherent control of longitudinal optical phonons in GaAs using polarized optical pulses with relative phase locking」では、電子フォノン複合系におけるアト秒精度のコヒーレント制御において、光パルスの偏光効果を取り扱う新たな理論モデルについて述べている。結晶の対称性を反映させるためにラマンテンソルの関係を電子-フォノン相互作用に導入することで、光パルスの偏光が量子干渉に及ぼす影響について議論が可能となった。構築した理論モデルにより、2 連光パルスの相対偏光と電子デコヒーレンス時間が、観測される量子干渉の形状にどのような影響を与えるのかを明らかにしている。

第三章「Ultrafast quantum path interferometry to determine the electronic decoherence time in n-GaAs」では、量子経路干渉法を用いた GaAs 中の電子デコヒーレンス時間の定量評価について述べている。2 連パルスの相対偏光角が $\pi/4$ の場合、干渉形状が電子デコヒーレンス時間に顕著に依存し、その形状変化が非常に可視化しやすいことを見出している。そこで、2 連パルスの相対偏光角の観点から、量子干渉形状とデコヒーレンスとの関係を実験的に評価した。環境温度によってデコヒーレンス度合いを変化させ、理論予測と一致する量子干渉形状の変化を観測した。さらには、電子デコヒーレンス時間の定量的評価法を発想し、10 K では 27.8 fs、90 K では 23.0 fs、290 K では 12.9 fs と決定

できた。またデコヒーレンス現象は、光励起された電子と伝導帯内の環境との間の電子散乱に起因するものであり、その中でも電子-電子散乱が主要な要因であることを見出している。

第四章「Influence of initial phonon states on the generation of coherent optical phonon」では、任意の初期状態におけるコヒーレントフォノン生成の理論的評価について述べている。熱平衡分布で決定されるフォノン分布を初期状態として定義し、有限温度下でのコヒーレントフォノン生成を調べた。その結果、固体物質における電子とフォノン間の結合定数は非常に小さいため、コヒーレントフォノン強度には、初期状態による影響は殆どないことが確認された。これは、量子干渉の理論評価において、ゼロフォノンの初期状態とした2次摂動計算で十分に評価できることを示唆している。

第五章「Coherent phonon generation with open quantum theory; optical intensity dependence」では、コヒーレントフォノン生成効率および量子経路干渉に対する励起光強度の依存性に関する理論的評価について述べている。バンド描像に基づいた従来の理論モデルを構築し、開放量子系による散逸演算子を用いた量子マスター方程式により、系の時間発展を評価した。その結果、量子経路がラマン過程の場合では、光吸収過程に比べて、比較的弱い光パルス強度において、コヒーレントフォノン生成効率の飽和現象が顕著に確認された。これは、単一パルスおよび2連パルス励起による実験結果での飽和現象を再現するものであった。さらに、励起状態で生じる散逸演算子を考慮することで、実験で観測される電子デコヒーレンスの様子が表現された。これは、第三章で明らかになった電子デコヒーレンスの要因と非常に整合することを示している。

第六章「Conclusion」では、本博士論文の結論を述べている。モデル系として GaAs を対象とした実験および理論研究により、電子フォノン複合系における量子コヒーレンスと量子経路干渉への影響が評価され、超高速領域での電子デコヒーレンス時間およびデコヒーレンス要因を明らかにした。また、デコヒーレンス要因として、電子-電子散乱以外の散乱効果についての考察も述べている。

これらを要するに、偏光と位相を制御したフェムト秒パルス列を用いた干渉実験と理論計算により、モデル系として GaAs を用いて電子のデコヒーレンス時間を決定し、デコヒーレンスの主要な過程が電子-電子散乱であることを見出している。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として十分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。