

氏名	Alban Lafuente-Sampietro		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 8421 号		
学位授与年月日	平成 30年 2月 28日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	数理物質科学研究科		
学位論文題目	Optical control of the spin of a magnetic atom in a semiconductor: hybrid hole-Mn spin and Cr spin (半導体中の単一磁性原子スピンの光による制御: 正孔-Mn スピン結合系および Cr スピン)		
主査	筑波大学教授	理学博士	黒田 眞司
副査	筑波大学教授	博士(工学)	末益 崇
副査	筑波大学教授	博士(学術)	都倉 康弘
副査	筑波大学教授(連係大学院)	工学博士	迫田 和彰

論 文 の 要 旨

本論文は、半導体量子ドット中の単一磁性スピンを対象とした著者の実験研究の成果を纏めたものである。具体的には CdTe の自己形成ドット中に遷移元素 Mn あるいは Cr の原子 1 個を含む系を対象とし、遷移元素の単一磁性スピンの振舞いを調べ、光によるスピン制御の手法を開拓し、量子情報処理などへの応用の可能性を議論している。固体中の単一スピンは、量子情報通信や量子演算への応用の観点から注目を集め、種々の系を対象とした研究が盛んに行われている。その中で本研究では、単一スピンとして、半導体ドット中の遷移元素の d 電子による局在磁気モーメントを対象に選び、ドット中の Mn あるいは Cr の原子 1 個を含む 2 つの種類のドット試料に対して顕微フォトルミネッセンス(PL)測定によりドット 1 個からの発光を測定し、ドット中の単一スピンのエネルギー構造、ダイナミクスを明らかにし、さらにスピンを光により制御することが可能であることを示している。本論文は以下の各章により構成されている。

第 1 章は本論文の理論的背景の紹介に充てられており、半導体の性質、ドットにおける量子閉じ込め、キャリアと磁性スピン間の交換相互作用についての説明が与えられた後、特に本研究で重要となる Mn および Cr スピンとキャリア間の交換相互作用に関する詳しい説明が与えられている。

第 2 章はドット試料の作製手法の説明に充てられている。本研究におけるドット試料作製に用

いられた分子線エピタキシー(MBE)に関する簡単な説明の後、格子不整合の半導体ヘテロエピタキシーにおける格子歪を駆動力としたいわゆる Stranski-Krastanov 様式によるドットの自己形成について説明されている。最後に本研究で実際に行われた ZnTe(100)上への CdTe 積層による自己形成ドット作製の詳細が紹介されている。

第3章では、Mn 原子 1 個を含むドットにおける単一 Mn スピンの振舞いが議論されている。電場印加によりドット内部を正の電荷に帯電させると、正孔と Mn スピンの結合した基底状態と正に帯電した励起子 X^+ と Mn スピンの結合した励起状態との間でいわゆる光学的なラムダシステムが形成される。著者は 2 波長励起のポンプ・プローブ測定を行うことにより、このラムダシステムにおける遷移のダイナミクスを詳細に調べ、正孔と Mn スピン結合系においてスピンはナノ秒オーダーの非常に速い緩和を示し、この速い緩和には音響フォノンおよび正孔と Mn 間の交換相互作用の双方が関与していることを明らかにした。

第4章では、今度は Cr 原子 1 個を含むドットにおける単一 Cr スピンの振舞いについて議論されている。磁場中の発光スペクトル測定により Cr スピン準位のエネルギー構造が明らかにされ、Cr スピン状態は自己形成ドット中の面内の格子歪と強く結合していることが示された。理論計算との比較により、格子歪により生じる Cr スピン準位分裂のパラメーター D_0 の値は 2-3 meV と Mn の場合に比べて 2 桁大きいことが示された。さらに正孔と Cr スピン間の交換相互作用は、従来考えられていたのとは逆に反強磁性的な相互作用であることが示され、その起源についての議論が提示されている。

第5章では、ドット中の単一 Cr スピンのダイナミクスについての議論が展開されている。まず自己相関関数の測定により Cr スピンの変動が調べられ、緩和時間が数ナノ秒であることが明らかにされた。さらに 2 波長のポンプ・プローブ測定において、Cr スピンの特定の準位を選択的に励起し発光の緩和を測定することにより、Cr スピン状態のダイナミクスが詳細に調べられた。その結果、励起子の存在下では Cr スピンの緩和は 10 ナノ秒程度と速いのに対し、励起子の存在しない暗状態では数マイクロ秒と極めて長いことが明らかにされた。さらに、強励起の条件下で光学的シュタルク効果による Cr スピン準位の分裂が実証され、光による Cr スピン準位の制御の可能性が示された。

審 査 の 要 旨

[批評]

近年、固体の微細構造中の単一の不純物原子や欠陥の振舞いに注目し、その量子状態を積極的に利用し新たなデバイス機能の発現を探索する”Solotronics”と呼ばれる分野が注目を集めている。中でも固体中の単一スピンは量子情報処理の観点から注目を集め、ドットに束縛された単一電子のスピンや同位体工学により制御された単一の核スピン、ダイヤモンド中の NV センターなどの種々の系を対象とした研究が盛んに行われている。その中で本研究は、半導体ドット中に遷移元素の原子 1 個を含む試料で実現される単一磁性スピンを対象としたオリジナルな内容の研究である。

ドット中の単一 Mn スピンの研究は著者が指導を受けたグルノーブルのグループによる研究の

歴史があるが、Mn スピンと正孔の結合系に着目した研究は初めてのものである。またドット中の Cr 原子 1 個を含むドットの作製および単一 Cr スピンの振舞いについては本研究が初めてのものである。著者はこの研究でドット中の単一 Mn スピンと正孔の結合系、および単一 Cr スピンの振舞いについて数多くのことを明らかにしている。特に両者の単一スピンに対する格子歪の影響を詳細に調べ、音響フォノンがスピン緩和に大きな役割を果たしていることを明らかにしている。さらに Cr スピンは軌道角運動量の存在により格子歪とより強く結合し、また暗状態では Cr スピンはマイクロ秒程度の長い寿命を持つことを示している。これらの成果は、単一 Cr スピンを量子ビットとして利用した量子情報処理の可能性、および格子振動と Cr スピンの結合による新しい量子系の開拓に繋がる可能性を提示したという点で高い意義を有するものと言える。

本研究の成果は *Physical Review B* をはじめとする原著論文 6 報として出版されており、博士論文としての水準を遥かに超える成果として極めて高く評価される。

〔最終試験結果〕

平成 30 年 1 月 26 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。