

二国間交流事業 共同研究報告書

令和6年4月12日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]

筑波大学・数理物質系

[職・氏名]

教授・黒田 眞司

[課題番号]

JPJSBP 120219904

1. 事業名 相手国: フランス (振興会対応機関: OP)との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 格子歪との結合を用いた単一スピンのコヒーレント制御

(英文) Coherent control of single spin using coupling with lattice strain

3. 共同研究実施期間 令和3年4月1日～6年3月31日(3年0ヶ月)

【延長前】 令和3年4月1日～5年3月31日(2年0ヶ月)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Institut Néel, CNRS and Université Grenoble Alpes・Research

Director・BESOMBES Lucien

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,800,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,900,000 円
	2年度目執行経費	1,900,000 円
	3年度目執行経費	円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	8名
相手国側参加者等	4名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目	0	0	0(0)
2年度目	0	0	0(0)
3年度目	1	0	1(0)

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣:委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。

受入:相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

固体中の単一スピンは量子情報処理への応用の観点から注目を集めており、世界中でさまざまな系を対象とした研究が活発に行われている。本研究においては、その中で半導体ドット中の遷移元素の原子 1 個による単一スピンを研究の対象とし、ドット中の単一スピンの種々の特性を明らかにし、量子ビットとしての応用の可能性を探索した。本事業において、日本側で主に試料の作製・評価を行い、フランス側で光学測定による単一スピンの検出・制御の実験を行うという協力体制の下で共同研究を推進した。あいにく本事業の期間中にコロナ禍による海外渡航制限がかかり、当初計画通りの人的交流はできなかったが、それでもオンラインなどで共同研究を遂行し、成果を上げることができた。

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本研究では、II-VI 族半導体 CdTe のドット中に遷移元素 Cr または Fe の原子 1 個の担う局在 d 電子のスピン対象として、ドット中の単一スピンの特性を明らかにし、量子情報処理への応用の可能性を探索することを目的として研究を行った。具体的には、下地層 ZnTe との格子不整合エピタキシーによる自己形成ドット(SAD)、ならびに CdTe/(Cd,Mg)Te の井戸幅揺らぎに起因する零次元閉じ込め(いわゆる無歪ドット— SFD)の 2 つの構造のドットに微量の Cr ないし Fe を添加した試料を作製し、遷移元素の単一スピンの相互作用による励起子発光スペクトルの分裂の観測により単一スピン状態の検出および制御を試みた。SAD に Cr を含む系に対する測定では、以前より観測されていた Cr イオンが+2 価の状態(Cr^{2+})における中性励起子発光の他に、+1 価状態の Cr イオンと正孔が共存する(Cr^+ +hole)の状態からの発光スペクトルを観測し、SAD のドット中では Cr イオンの多様な状態が実現することを確認すると共に、これらの多様な Cr 価数の状態が発現する起源として Cr 添加に伴う CdTe 結晶中の欠陥生成について考察した。一方、SFD に Fe を添加した試料の作製と光学測定も行い、 Fe^{2+} 状態における励起子発光スペクトルを観測した。以前に報告された SAD 中の単一 Fe スピンの系における発光スペクトルとの比較により、格子歪の有無が Fe スピン状態に大きな影響を与えることを見出した。これらの研究成果は、3 編の共著論文、9 件の学会発表という形に纏められている。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

本事業は、日本側代表者の黒田とフランス側代表者の CNRS ネール研の Research Director(現在)である Dr. Lucien Besombes との間のこれまでの研究協力をさらに発展させ、双方の学生と研究者が相互交流し、共同研究をさらに推進することを目的として行った。あいにくコロナ禍による海外渡航制限を受け、当初の事業期間の 2 年間は直接の人的交流は出来なかったが、オンラインによるミーティング、さらに宅配便による試料送付などにより研究を継続することができた。延長期間の 3 年目にはこれらの制限が解除され、研究者の派遣、受入れによる対面での交流が再開され、より効率的に共同研究を進めることができた。さらに日本側から派遣された大学院生がフランス側の研究室に滞在して実験を行い、Fe を含む SFD 中の単一 Fe スピンの発光スペクトルの観測を行い、Fe スピンの振舞いを明らかにするという成果を上げることができた。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

本事業では、半導体ドット中の単一スピンという研究テーマに対し、日本側で試料作製、フランス側で光学測定による単一スピンの検出・制御を行うという協力体制での共同研究を行い、(2)に記載したような学術的成果を上げることができた。これらの成果は、ドット中の磁性元素の単一スピンは量子ビットとして利用可能であることを

示しており、現在の科学技術の課題の一つである量子情報処理・通信の実現を目指す上で重要な成果であるといえる。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

本事業においては、学生および若手研究者が相互派遣を通じて共同研究に参画し、異なる環境に身いて研究を行うという経験を得たことは、将来のキャリアの可能性を広げることにつながると期待できる。とりわけ、日本側の大学院生が相手側研究室に滞在して研究に携わったことは、指導教員の下を離れ周囲の研究者と英語でのやりとりをしながら実験を進めていくという本人にとっては得難い経験であり、その後の研究に対する意欲の向上と自身のキャリアに対する真剣な検討につながったという点で、人材育成面での大きな貢献といえる。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

本研究により半導体ドット中の単一スピンの研究が大きく進展し、とりわけ SAD と SFD という異なる構造のドット中の遷移元素のスピンの振舞いの比較により、格子歪の有無が遷移元素のスピンの与える影響を明らかにした。これは、格子歪によるスピン状態の変調・制御の実現を目指す上で重要な知見となり、単一スピンの担う量子情報を格子振動により離れた場所に伝達するいわゆる「量子バス」の実現につながる成果であるといえる。一方、研究交流の面では、本事業を契機に筑波大ーグルノーブル間の協力体制が強化され、今後も共同研究がより推進されるものと期待される。加えて、本事業とは別に、同じ半導体ドット中の単一磁性スピンの研究を行っているポーランド・ワルシャワ大学のグループとの交流の機会もあり、今後は日本ーフランスーポーランドの 3 国間の協力による研究の進展も期待される。

(7)その他(上記(2)~(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例: 大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

本事業の遂行をはじめとする筑波大とグルノーブルの研究諸機関間の研究交流の進展の結果、2022 年より CNRS の海外研究拠点(IRL)が筑波大に設置されることとなった(J-FAST)。