



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	ナノ構造半導体における電子・核スピン結合系のダイナミクスと核四極子相互作用 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	松崎, 亮典
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13991号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78206
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Ryosuke_Matsusaki_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 松崎 亮典

審査担当者 主 査 教 授 足立 智
副 査 教 授 戸田 泰則
副 査 准教授 鈴浦 秀勝

学位論文題名

ナノ構造半導体における電子・核スピン結合系のダイナミクスと核四極子相互作用
(Dynamics of the coupled spin system of an electron and nuclear ensemble and nuclear quadrupole
interaction in semiconductor nanostructures)

異種の量子系が結合したハイブリッド量子系の研究が近年、精力的に行われている。本研究で扱われている半導体量子ドット (QD) は、Si 中のドナー準位やダイヤモンド色中心などと同じく、ハイブリッド量子系を実現する構造として注目を集めている。

ナノ構造半導体の 1 つである QD では、電子波動関数が 3 次元的な閉じ込めを受けるため、内部に局在する電子スピンと原子核スピン集団との間に働く磁気的な相互作用 (超微細相互作用:HFI) が増強される。この結果、電子スピンと核スピン集団は 1 つのハイブリッド量子系を成すが、外界から孤立した核スピン集団の分極 (核スピン分極) は一般に長いコヒーレンス時間を持つことから、量子情報を保存するメモリ機能としての応用に有望である。また、局在キャリアの特性を活かした応用として、単一光子発生や量子ビット操作の研究も進められているため、QD は量子情報の通信・演算・ストレージの全てのプラットフォームとなる可能性を秘めている。これまでに光や電 (磁) 場などを使った電子スピンの精密な量子操作が実証されているので、HFI を介して結合した核スピン集団に対しても同程度の量子状態操作が可能と考えられるが、現段階では実証されておらず、電子・核スピン結合系の物理をより深く理解することに加え、有力な核スピン集団制御ツールを提案することが望まれている。

本研究では、核四極子相互作用 (NQI) が核スピン分極の形成・緩和メカニズムに与える効果に着目し、電子・核スピン結合系のダイナミクスモデルを再構築することを目的としている。NQI は、核スピンドラッグングや面内核スピン分極形成など、格子歪みを形成駆動力とする自己集合 QD でのみ報告されている種々の興味深い現象との関連が指摘されている。そこでまずは、QD 局在電子スピンのダイナミクスで重要なパラメータとなる電子 g 因子とスピン緩和時間の簡便な評価方法を開発し、手法の汎用性の高さを実証している。更に、弱磁場領域 (1 テスラ未満の縦磁場環境) での核スピン分極に注目し、HFI に係る有効磁場を詳細に調べると共に、NQI が電子・核スピン結合ダイナミクスに与える影響を吟味している。これらの成果は、本研究が目指す電子・核スピン結合系の量子インターフェースの実現に向けて、重要な知見と手法を与えている。

本論文は 6 章から構成される。以下に各章の要旨を述べる。

第 1 章「序論」では、半導体 QD における核スピン分極研究の重要性を核スピンエンジニアリングの観点から述べるとともに、本論文の目的と意義を明らかにしている。

第 2 章「半導体量子ドットのスピン物性の基礎」では、半導体 QD に関する光学データを読み解

く上で考慮すべき荷電状態やゼーマン相互作用, HFI, 核スピン間の双極子相互作用, および電子・核スピン結合系での有効磁場など, 基礎的な事項についてわかりやすく解説している.

第3章「試料構造と光学測定システム」では, 本研究で用いたナノ構造半導体試料と, 超電導マグネットを含む顕微磁気発光測定系を紹介している. また, 単一 QD スペクトルの典型例を示し, 荷電状態の同定について言及している.

第4章「電子・核スピン結合系のダイナミクス」では, 光生成電子スピン分極が HFI を介して巨大な核スピン分極を形成する動的核スピン分極プロセスについて詳細に記述している. まずは, 励起光強度や励起偏光, 縦磁場強度に対する核スピン分極の双安定現象 (核スピンスイッチング) について, 実験と理論の両面から議論しており, その後, 核スピンスイッチングの応用例として, 電子・正孔 g 因子の個別評価と電子スピン緩和時間の測定について述べている. スピンの磁気応答を決める g 因子や, 量子情報の保持時間を左右するスピン緩和時間を, 定常発光測定という簡便なツールで評価できるようになったことには大きな意義がある. また本研究では, 単一 QD 発光の光子相関計測を電子・核スピン結合系のダイナミクス探査に適用しており, この初めての試みは現段階では定量的な議論にまでは至っていないが, 時間領域の情報を与える本手法はスピンドイナミクスを調べる上で強力なツールとなる可能性を示している. 最後に, 零磁場下での核スピン分極の観測結果を示し, HFI を介して電子スピンが作る有効磁場 (Knight field) について議論している. また零磁場環境での核スピン分極の測定精度を向上させるために, QD 発光の検出パスに改良を加えており, それらについても解説している.

第5章「核四極子相互作用と核スピン分極ダイナミクス」では, まず NQI の詳細を記述し, 核準位のゼーマン効果に与える影響を議論している. その後, 弱磁場環境での核スピン分極の観測結果から, QI が分極形成・緩和ダイナミクスに与える影響を論じている. 特に実験条件や環境に依存して, NQI が核スピン分極緩和時間の伸長と短縮という相反する効果をもたらすことを明らかにしている. 更に, 現在進行中の歪印加デバイスの作製と, それを利用した NQI のチューニングに関する展望を記述している. 外部歪みは, NQI を通して核スピン集団の制御ツールとなることが期待される一方, 価電子帯混合を介して正孔スピン制御にも利用できると考えられていることから, ナノ構造半導体に効率的に歪みを伝播させるデバイスの作製は重要である.

第6章「結論」では, 本論文の総括を行うとともに今後の展望について述べ, ハイブリッド量子系としての QD における電子・核結合系の量子インターフェースの実現に大いに寄与する研究と位置づけしている.

これを要するに, 本研究は半導体量子ドットにおける電子・核スピン結合系において, 零・弱磁場環境下での核スピン分極緩和ダイナミクスに核四極子相互作用が与える影響を実験的に初めて明らかにした先駆的研究であり, ハイブリッド量子系におけるスピン状態制御や量子メモリの実現に寄与するところ大なるものがある. よって著者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.