HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | ナノ構造半導体における電子-核スピン結合系ダイナミクス［論文内容及び審査の要旨］ |
| Author(s) | 山本, 壮太 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(工学) |
| Dissertation Number | 甲第14429号 |
| Issue Date | 2021-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/81191 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Sota_Yamamoto_review.pdf, 審査の要旨 |




Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　山本　壮太

審査担当者　主　査　教　授　足立 智
副　査　教　授　明楽 浩史
副　査　教　授　戸田 泰則
副　査　教　授　植村 哲也　（情報科学研究院）

学位論文題名

ナノ構造半導体における電子-核スピン結合系ダイナミクス
(Dynamics of electron and nuclear spin-coupled system in semiconductor nanostructures)

半導体量子ドット (QD) に局在する電子は, 核スピン集団との間に働く接触型超微細相互作用 (HFI) を増強するため, 電子から核へのスピン角運動量の転写が容易に実現し, QD には分極率～80% までの大きな核スピン分極 (NSP) を円偏光励起による電子スピンの光注入通じて数十マイクロ秒で形成できる. NSP は QD 内電子を除去すればスピンメモリ時間は数時間に及ぶ. QD 内局在電子は離散化準位や優れたスピンコヒーレンスにより, 単一光子源や量子ビットへの応用が期待でき, 更に核スピンを用いてメモリ機能を付与できる. 同時に化合物半導体特有のバンドギャップ制御により通信波長帯光量子ビットとの親和性も高い. 従って, QD は量子情報の演算・ストレージ・通信の全てのプラットフォームとなり得る.

QD に代表されるナノ構造では HFI を介して 1 個の電子スピンと $10^4$-$10^5$ 個の核スピン集団が強く結合し, Overhauser Field (核磁場) と Knight Field として電子スピンと NSP にそれぞれ影響し, 2 つのスピン系は相互に発展する. すなわちスピン結合系では互いのデコヒーレンスが伝搬し合うというネガティブな側面と相互に分極を制御できるというポジティブな側面が共存する. 従って, これまでに光・電 (磁) 場を組み合わせた電子スピンの精密操作は実証できている為, 電子スピン制御を介して同程度の微細操作が核スピンにも可能なはずだが, 複雑な物理の為にその量子状態制御は未だ研究途上にある. 量子状態制御や量子メモリ等の実現の為には, ナノ構造での電子・核スピン結合系固有の複雑な物理を解明していく必要がある.

本研究では, Faraday 配置においてこれまで 2 つと考えられてきた NSP 安定状態に 3 つ目が存在することを実験的に発見し, 核スピン揺らぎを取り入れたモデルにより説明に成功している. 提案したモデルでは, 外部磁場と核磁場の相殺条件近傍で核スピン揺らぎにより電子スピン偏極度が大きく低下することで NSP の形成レートと緩和レートが釣り合い, 新たに安定状態が出現することを明らかにしている. 提案モデルは, 特定の材料や閉じ込め構造に依存したメカニズムは含まない. そのため 3 つの安定状態は HFI を介した電子–核スピン結合系に本来備わっている性質であるとしている.

更に Voigt 配置で観測される, 結晶成長軸に沿って注入される電子スピンと直交した大きな面内核磁場形成 (異常 Hanle 効果) の発生メカニズムを種々の測定から考察している. 自己集合 InAlAs QD とは逆符号の電子 g 因子を持つと InAs QR でも同様に異常 Hanle 効果の発現を確認しており, 面内核磁場形成が電子 g 因子の符号に依存しないことを示した. これらは, 従来の核スピン冷却理

論の文脈とは大きくかけ離れた現象である. このような現象は残留歪のない液滴成長の QD では発現しないことから, 自己成長ナノ構造に特有な残留歪誘起の核四極子相互作用 (NQI) が異常 Hanle 効果の発現に大きな寄与があると考えられる. 本研究では, NQI が支配する核スピン系では核スピンが大きな磁気異方性を獲得することを考慮して, NSP が結晶成長方向に固定成分を持ち, 核の g 因子が成長軸と成長面内で異なる符号を取ると仮定した現象論的モデルを提案し, 実験結果の説明に成功している.

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, ナノ構造半導体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「単一量子ドットの顕微分光測定」では, 半導体物理の基本であるバンド構造と光学遷移について簡単に述べ, 測定試料と単一 QD 発光の定常及び時間分解測定系について詳細に説明している.

第 3 章「電子–核スピン結合系」では, QD 発光を解析する上で考慮すべき HFI, 核スピン分極の動的形成, 並びにその反作用としての電子スピン系の変調について理論的に述べており, さらに自己集合 QD に特有な NQI の効果について実験結果も交えて詳細に説明している.

第 4 章「縦磁場中の核スピン分極」では, Faraday 配置で観測される NSP について議論し, 核スピン揺らぎによる電子スピン緩和が NSP の形成メカニズムに与える影響について述べている. 実験と理論の両面から, これまで 2 つであると考えられてきた NSP の安定状態に第 3 の安定状態が存在することを示している. また, NQI の効果を詳細に検証するため NSP を核スピン系の固有状態の占有率から表現し, 実験結果や現象論的なレート方程式との比較から NS の緩和メカニズムについて論じている.

第 5 章「横磁場中の核スピン分極」では, Voigt 配置で観測される NSP について議論し, NQI が支配する自己集合 QD や QR では, 異常 Hanle 効果と呼ばれる結晶成長方向に注入された電子スピンと直交する大きな核磁場の形成が起こる. この形成メカニズムを探るために行ったいくつかの実験結果を報告し, さらに実験結果を定性的に説明するモデルを提案している.

第 6 章「総括」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ている.

本研究は, 単一半導体ナノ構造を対象として, 電子の局在化により増強される電子・核スピン間の接触型超微細相互作用と残留歪み等が誘起する核四極子相互作用に着目し, それらが電子・核スピン結合系ダイナミクスに及ぼす影響を顕微分光技術と理論計算を駆使して明らかにしている. 特に実験的に検証されてきた既存の理論では説明できない NSP の第 3 の安定状態の発見や異常 Hanle 効果を定性的に説明するモデルの提案など画期的な成果を得ている.

これを要するに, 本研究はナノ構造半導体における電子・核スピン結合系ダイナミクスを核磁場揺らぎと核四極子相互作用の効果に着目して, 実験的・理論的に考察し, 未解明の物理を明らかにしており, ハイブリッド量子系における量子情報処理および固体スピン物性の発展に寄与するところ大なるものがある. よって北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.