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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学　位　論　文　内　容　の　要　旨

博士の専攻分野の名称　　博士（工学）　　氏名　山本　壮太

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 は良い孤立系であり, 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である. 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, 種々の磁場配置での電子・核スピン結合系の実験結果・理論的考察から統一的なスピン結合系ダイナミクスモデルを構築することを目的としている. 実験的には, 従来の理論的枠組みでは説明不可能な現象である核スピン分極の第 3 安定状態の発見と注入電子スピンと直交する大きな面内核スピン分極の形成という 2 つの画期的な成果を得ている. 更に, それらの結果を核スピン揺らぎと核四極子相互作用 (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て, 理論的に説明するモデルを提案し, 定性的説明に成功している. これらの成果は, スピン結合系固有の幾つかの未解明現象を解決できるだけでなく, 多重安定性を利用した新規スピンメモリ, 3 次元的な核磁場自在制御等への展開を図ることができる.

本論文は 6 章から構成される. 以下に各章の概要を述べる.

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する.

第 2 章「単一量子ドットの顕微分光測定」では, ここでは半導体の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る. バルク半導体と量子ドットの光物性には多くの共通項があるため, まずバルク半導体について述べた後, 量子ドットにおける励起子発光について述べる. また, 測定試料および用いた単一 QD からの微弱な定常発光と時間分解発光の測定系の詳細について記述する.

第 3 章「電子-核スピン結合系」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 HFI, 核スピン分極の動的形成過程, 反作用としての電子スピン系の変調, および自己集合 QD 特有の核四極子相互作用ついて実験結果を交えて理論的に説明する.

第 4 章「縦磁場中の核スピン分極」では, Faraday 配置における核スピン分極について議論する. まず, 核四極子相互作用の効果を検証するために, 核スピン分極を固有状態の占有率の方程式を記述する. 実験結果や現象論的なレート方程式との比較から, ナノ構造半導体における核スピン系の主な緩和メカニズムが, 核四極子相互作用以外に由来することを確認する. さらに, 自己集合のナノ構造半導体における核四極子相互作用の主軸が, 結晶成長軸から大きく傾く可能性について議論する. また, 電子-核スピン間の結合のもうひとつの側面である, 核スピン揺らぎによる電子スピン緩和が, 核スピン分極の形成メカニズムに与える影響を議論する. これまで 2 つだと考えられてきた核スピン分極の安定状態には, 第 3 の安定状態が存在することを実験と理論の両面から示す.

第 5 章「横磁場中の核スピン分極」では, Voigt 配置で観測される核スピン分極について述べる. 結晶成長方向に注入された電子スピンと直交した方向に形成される大きな面内核スピン分極の形成メカニズムを探るため行ったいくつかの実験について報告する. これまで注入電子スピンと直交する磁場配置では, 大きな核磁場は形成されないとされている従来理論に反する異常ハンル効果について, 定常発光, 時間分解発光測定結果を説明する理論モデルを提案する.

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る.