

# 論文審査の結果の要旨

氏名 フォン チー ファイ

本学位論文 Study on Nuclear Spin Manipulation in Single Quantum Dots by Optical Spin Pumping は、InAs 量子ドットに対して電子スピン偏極を光励起し、超微細相互作用により核スピンを偏極させ、これを顕微分光により各単一量子ドットについて調べた研究について述べたものである。

本論文は7つの章からなる。第1章は、背景事項のサマリーと研究目的の紹介である。

第2章では、InAs 自己形成量子ドットについて、成長方法とドット内電子状態(s 殻, p 殻などの準位構造)について述べ、特に研究上重要となる励起子およびその複合体について詳述している。バンドのスピンの円偏光吸収の選択側を説明し、円偏光励起によりスピン偏極を行う実験手法について解説している。

第3章は、量子ドット中のスピン系についての解説で、キャリアスピン、核スピンについて、g 因子、超微細相互作用などのパラメーターを紹介の後、互いのスピン偏極が核スピン側からはキャリアスピンにより作られるナイト磁場、キャリアスピン側からは核スピンによるオーバーハウザー磁場として感じられることを述べている。キャリアスピン偏極が超微細相互作用を通して核スピン偏極を引き起こす動的核スピン偏極(DNP)について述べ、実験解析のための関係式を準備している。

第4章からが、著者らの研究の記述である。偏光励起 PL スペクトルに励起子  $X^+$ ,  $X^-$ ,  $X^0$ ,  $XX^0$  のピークが現れ、直線偏光励起の偏光方位に対する応答から同定される。励起光強度を強めると、s 殻励起に加え、p 殻励起による励起子ピークが現れ、高強度では後者が優勢となる。DNP の割合と、核スピン偏極の飽和時間を測定する方法として、スピン注入のための円偏光( $\sigma^+$ ,  $\sigma^-$ )を高周波で切り替え、オーバーハウザー磁場による PL ピーク( $X^+$  ないし  $X^-$ )のシフトをピーク幅として高周波周期の関数として検出する手法を導入している。第3章で用意したレート方程式によるシミュレーションを行い、実際に核スピン偏極と飽和時間が求められることを確認した。

励起光強度の関数として飽和時間とオーバーハウザーシフトを測定したところ、p 殻励起が優勢となる強度でいずれも急速に大きくなることを見出した。新しい知見であると同時に、核スピン偏極を高める技術として有望である。物理的な理由として、p 殻励起による励起子波動関数の空間分布が、InAs 量子ドットのピラミッド形状によりフィットしており、広範囲の核スピンを偏極できるという考察を行っている。

第5章では、量子ドットをフォトリソニック結晶によるキャビティ中に配置し、光学バンドギャップによって PL 緩和時間を分布させ、円偏光励起の向きによる発光エネルギーの違い

(オーバーハウザー効果によるゼーマン分裂)と緩和時間との関係を調べた。量子ドットをキャビティ内にランダムに分布させて、顕微分光により個別に緩和時間を得ており、光学バンドギャップ以外の緩和時間決定要因などの影響もあり、データの分布は大きい。それでも、緩和時間が長くなるにつれて、キャリア-核スピン相互作用の頻度減少によりゼーマンシフトが小さくなる傾向は確認できた。また、定磁場を印可することで PL 位置がシフトするだけでなく、緩和時間依存性に変化が生じる。これも定性的ながら、レート方程式から理解することができる。レート方程式による解析の信頼度を確認したところで、更に緩和時間が短い領域でモデル計算を行い、高い核スピン偏極が得られるという指針を得た。

第 6 章では、有限時間差分領域法によるシミュレーションを行い、フォトニック結晶と軌道角運動量を持った光との組み合わせによって高いスピン偏極を得られる可能性を示している。第 7 章で全体の結論を与えている。

以上のように、論文提出者は本論文において、新しい測定手法により量子ドット中の光励起による核スピン偏極について効率の高い方法を見出すとともに新たな物理的知見を得、更にフォトニック結晶中の量子ドットという新しい系に測定対象を広げ、ここでも緩和時間と核スピン偏極との関係について考察を行った。これらの知見を元に、更に効率の高い手法の提案を行っている。これらの結果は、キャリアスピン-核スピンの相互作用に関する理解を深めると同時に、量子ドット中の核スピン制御に新しい方向性を示すものである。また、共同研究の成果である部分についてもフォン チー ファイ氏の寄与は主要なものであると認められ、論文の内容と形式は東京大学大学院理学系研究科における博士論文に関する指針に則っている。

以上の理由により、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。