単一量子ドットにおける核四極子効果と面内核磁場形成 II Nuclear quadrupolar effect on the formation of in-plane nuclear field in a single quantum dot II 北大院工 〇山本壮太,松崎亮典,鍜治怜奈,足立智

Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, OS. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, S. Adachi E-mail: yama-st@eis.hokudai.ac.jp

【はじめに】半導体ナノ構造中では,電子の局在化によって超微細相互作用 (HFI)が増強されるため,偏極した電子スピンを注入すると核スピン系にスピン運動量が転写され核スピン分極 (NSP)が形成される.NSP と電子スピンとは相互の安定化・緩和に寄与し合うため,その形成・緩和メカニズムの解明はスピン応用デバイスの実現において非常に重要な課題である.これまで NSP は電子スピンに対して平行にしか形成されないとされてきたが,核磁場による印加磁場の相殺によって通常の Lorentz 型 Hanle カーブの 10 倍以上の幅を持ち,臨界磁場で双安定を示す異常 Hanle カーブの観測から,電子スピンと直交する向きの NSP 形成が実験的に明らかとなった [1,2].またこれまでに,動的核スピン分極機構に核四極子相互作用 (QI)がもたらす NSP の保護効果と核の g 因子の面内・面直での符号反転を仮定することでモデル計算との定性的な一致を報告してきた [2,3].今回は,定量的な一致を目指したモデル改善のために, InAs/GaAs 量子リングで異なる荷電状態(X^+, X^-)の Hanle 効果測定を行い, InAlAs QD との比較を通じて面内核磁場形成メカニズムの詳

細を議論したい.

【核四極子効果による NSP の保護】自己 集合 QD においては,その形成過程で必 要とした歪みが完全には解放されずに QD 形成後も内包される.そのため歪み分布 に起因する不均一電場勾配 (EFG) が核ス ピン I > 1/2 と QI で結合する.この QI の強さを有効磁場換算すると核四極子場 $B_Q=200~400 \text{ mT}$ にもなり,電子スピンが 作る有効磁場 B_e (~1 mT),核スピン間の 双極子磁場 B_L (~0.15 mT)に比較して,核 が感じる有効磁場として格段に大きい.図





1に(a) 縦磁場,および(b) 横磁場おける As 核準位の Zeeman 分裂における QI の効果を示す.図では簡単のため,EFG の主軸はz軸に平行としているため,0Tで核準位間の混合の効果は無い.図を見て分かるように,0Tで核四極子分裂があるものの,縦磁場下ではZeeman 分裂がシフトするだけだが,横磁場下ではそれぞれの準位が磁場による状態混合を伴った複雑な分裂を示し,磁場に依存する g 因子分布を持つようになる.特に $I \ge 3/2$ の準位は In, Al でも横磁場に対して不敏感であり,この効果がz軸方向の NSP の保護に繋がる.

【実験】QR は QD の形状が変化したリング状のナノ構造であり, QD と同様に残留歪を内包している.既に z方向の核磁場形成は確認され,面直・面内 g 因子も測定している[4].また InAs QR では正のトリオン X^+ だけでなく,負のトリオン X^- も観測される.基底状態の X^- では電子がスピンー重項であり正孔スピンが発光の偏光状態を決定する.価電子帯が p 軌道由来であることから正孔は核スピンとの HFI は格段に弱い.そのため核磁場の影響下における X^- 発光の Hanle カーブは X^+ とは異なる振る舞いを示すことが期待される.さらに,InAlAs と InAs では電子の g 因子 g^e と正孔の g 因子 g^h の積 ($g^e \cdot g^h$)の符号が異なる [4].核スピン冷却理論によると g^e は核磁場の向きを決定するパラメータの一つであり,InAlAs と InAs で形成される核磁場を比較することで,面内核磁場形成メカニズムの詳細を議論することができる.

[1] O. Krebs, P. Maletinsky, T. Amand, B. Urbaszek et al., Phys. Rev. Lett. 104, 056603 (2010).

[2] S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, and S. Adachi, arXiv:1710.00333 (2017).

[3] 山本壮太,松崎亮典,鍜治怜奈,足立智,第78回応用物理学会秋季学術講演会 6p-A405-14.

[4] R. Kaji et al., phys. status solidi b 254, 1600486 (2017), Appl. Phys. Express 7, 065002 (2014).