

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 Nuclear quadrupolar effect on the formation of in-plane nuclear field in a single quantum dot

北大院工 ○山本壮太, 松崎亮典, 鍛冶怜奈, 足立智

Division of Applied Physics, Hokkaido University, Sapporo, Japan,

○S. Yamamoto, R. Matsusaki, R. Kaji, S. Adachi

E-mail: yama-st@eis.hokudai.ac.jp

【はじめに】半導体量子ドット (QD) 中では、強い閉じ込めにより電子が局在化し、電子-核スピン間の超微細相互作用 (HFI) が増強され、大きな核スピン分極 (NSP) が形成される。その形成・緩和メカニズムの解明と制御は、量子メモリやもつれ光子対源等のスピン応用デバイス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、電子スピンと直交する向きにも形成されることが実験的に明らかとなった [1,2]。本研究は、このような電子スピンと直交する面内 NSP の形成メカニズムの解明を目的としており、その原因として注目される核四極子効果について議論する。

【核四極子効果】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 $I > 1/2$ と核四極子相互作用 (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 $B_Q = 200 \sim 400$ 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 (ただし B_Q は通常の意味での磁場ではなくスピン分裂を引き起こさない)。QI が引き起こす効果 (核四極子効果) としては、①核のエネルギー準位の不等間隔分裂から生じる核双極子間結合の抑制に起因する NSP 緩和レートの減少、②結晶成長軸 (z) と EFG の主軸 (z') が平行でない場合、状態 $|I_z\rangle$ と $|I_z \pm 1\rangle$ の結合 (quadrupolar mixing) と HFI 時間揺らぎの $S_z I_z$ の項から起こる NSP 緩和レートの増大、の 2 つの効果が考えられる。①は零磁場での大きな NSP 生成 (B_e による核スピンクーリング) と非常に遅い核スピン拡散等を生む。一方、②は縦磁場印加による quadrupolar mixing の低減による緩和レートの抑制として観測できる [3]。無歪な液滴成長 QD では図 1(a) の様な異常 Hanle カーブが観測されない [4] ことから、面内核磁場 B_N^x 形成にも核四極子効果が大きく寄与しているとして注目されている。

【モデル計算】図 1(a) に単一自己集合 InAlAs QD の正のトリオン X^+ の発光スペクトル測定から得た異常 Hanle カーブを示す。スピン寿命から期待される通常の Hanle カーブ (点線) の半値全幅を大きく超え、円偏光度 (DCP) が急激に変化する臨界磁場でヒステリシス (したがって双安定) を示すことが大きな特徴である。これは印加横磁場 B_x を補償する B_N^x が形成され、電子が実際には小さな磁場しか感じていないことを強く示唆している。定常的な $\langle S_x \rangle$ が有れば、HFI により B_N^x が形成可能だが、磁場の方向に依らず双安定性を示すことがこれまでの動的核分極 [5] とは大きく異なっている。図 1(c) は (b) に示す核スピンおよび電子スピンの感じる有効磁場と核四極子場の効果を取り入れたモデル計算による Hanle カーブである。未だ定量的な議論ができる段階ではないが、定性的な特徴は良く再現できている。モデルの詳細は講演に譲る。

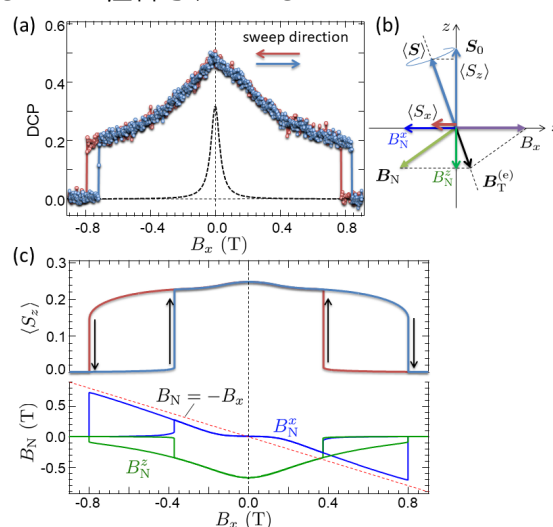


図 1: (a) 自己集合単一 InAlAs QD で観測された異常 Hanle カーブ, (b) 電子、核スピンの感じる有効磁場, (c) QI の効果を考慮したモデル計算結果。 X^+ PL では、 $\langle S_z \rangle = \text{DCP}/2$ 。

- [1] O. Krebs, P. Maletinsky, T. Amand, B. Urbaszek et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 056603 (2010).
- [2] 山本壮太, 松崎亮典, 鍛冶怜奈, 足立智, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20a-S223-6
- [3] R. Matsusaki, R. Kaji, S. Yamamoto, H. Sasakura, and S. Adachi, arXiv:1703.06046 (2017).
- [4] G. Sallen, S. Kunz, T. Amand, L. Bouet, T. Kuroda et al., Nat. Commun. **5**, 3268 (2014).
- [5] R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, Phys. Rev. B **77**, 115345 (2008).