

単一量子ドットにおける面内核磁場形成機構の研究

Study on formation mechanism 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、QD の量子情報処理等への応用において非常に重要な課題である。通常、NSP 形成では、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いる。今回は異常ハンルカーブに見られるヒステリシスに注目し、実験結果を報告しつつ形成メカニズムを議論する。

【実験】キャリアスピンは磁場中で Larmor 歳差運動するため、発光の円偏光度 (DCP) は、横磁場強度の増加に伴って減少する (Hanle 効果)。理論上この変化は、磁場強度を変数とした Lorentz 関数となり、半値幅がスピン寿命に反比例する。実験では、単一 InAlAs QD を 8 K まで冷却し、Voigt 配置で円偏光による濡れ層の励起を行い、正の荷電励起子 (X^+) からの発光の DCP を磁場強度を掃引しながら測定した。基底状態の X^+ は正孔がスピン 1 重項であるため、Hanle カーブの形状に寄与するのは電子のみである。DCP 測定での誤差を小さくする為、ビーム分離プリズムによって発光の σ^+ , σ^- 成分を分離して、CCD 検出器の異なる領域に集光することで同時検出した。

【結果】図 1(a) に観測した異常ハンルカーブを示す。横軸は印加磁場強度、縦軸は X^+ 発光の DCP である。青、赤点はそれぞれ磁場を図中矢印の方向に掃引したデータである。QD 局在電子スピンで期待される 1 ns のスピン寿命の場合の Hanle カーブ (点線) と比較すると極めて異常で、Lorentz 関数とは大きく異なる形状となっている。DCP は印加磁場の掃引方向に依らず ± 0.8 T の範囲では緩やかに減少するが、 ± 0.8 T 付近で急激な減少 (または増加) を示す。また、磁場掃引方向に依存して、DCP の急変が起こる磁場値 B_c が異なるヒステリシスも確認できる。Voigt 配置で ± 0.8 T という大きな範囲で高い DCP が維持されていることから、電子スピンは極めて小さな有効磁場しか感じていない、すなわち印加磁場を相殺する向きに核磁場が形成されていることが考えられる。また、観測されるヒステリシス現象は、ペアとして出現する核磁場の双安定現象に起因していると考えられる。この面内核磁場 B_N^x の形成を上記の印加磁場相殺のシナリオで説明するには 2 つの条件が成立する必要がある。図 1(b) に大きな B_x の下で電子が感じる磁場を示す。このシナリオが成立するためには、まず電子スピン $\langle S \rangle$ の面内成分 $\langle S_x \rangle$ の出現が要求される。

1. 零磁場でも大きな B_N^z が形成でき、それにより DCP が向上することは実験的にも示される [3]。大きな B_x が印加された状況でも B_N^z が保持できれば、 $\langle S \rangle$ は斜めの合成磁場を感じて傾き、面内成分 $\langle S_x \rangle$ が出現する。 B_x が印加されても、 B_N^z が面内に倒れず、 z 成分を保持するには核四極子場等による B_N^z の固定が必要である。

2. 電子が感じる B_N の方向は g_e の符号で決まる。図は $g_e < 0$ の場合を示して

おり、確かに $\langle S_z \rangle$ に依り逆向き B_N^z が形成され、それにより $\langle S_x \rangle$ が出現する。しかしそれが動的核分極により B_x を相殺する B_N^x を形成するためには、図のように $g_e < 0$ にも拘わらず B_N^x が $\langle S_x \rangle$ と同方向に形成されねばならない。 g_e には面直・面内での大きな異方性は考えにくいので、この条件を満たすためには核の g 因子 g_N の面直・面内成分が異符号であることが要請される。

その他の実験結果の報告および議論の詳細は講演に譲る。

[1] O. Krebs et al., PRL **104**, 056603 (2010). [2] 山本 他, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (20a-S223-6). [3] 松崎 他, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (20a-S223-5).

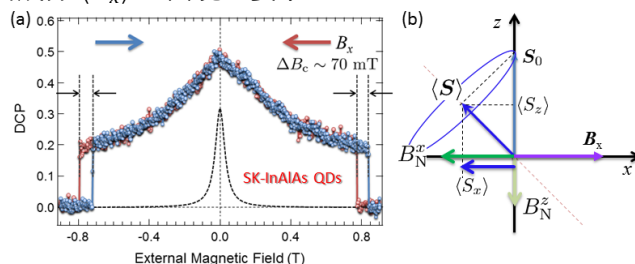


図 1: (a) QD の X^+ 発光から測定した DCP. 図中の矢印は印加磁場の掃引方向. (b) 電子スピンの感じる有効磁場 ($g_e < 0$ の場合).