

# 量子井戸における電子 g 因子の磁場依存性

伊藤哲<sup>A</sup>, 志智亘<sup>B</sup>, 岡見吉隆<sup>B</sup>, 市田正夫<sup>A,B</sup>, 後藤秀樹<sup>C</sup>, 鎌田英彦<sup>C</sup>, 安藤弘明<sup>A,B</sup>

<sup>A</sup> 甲南大学量子ナノテクノロジー研究所

<sup>B</sup> 甲南大学大学院自然科学研究科

<sup>C</sup> NTT 物性科学基礎研究所

## Magnetic Field Dependence of Electron Spin g-Factor in Quantum Wells

T. Ito<sup>A</sup>, W. Shichi<sup>B</sup>, Y. Okami<sup>B</sup>, M. Ichida<sup>A,B</sup>, H. Gotoh<sup>C</sup>, H. Kamada<sup>C</sup>, and H. Ando<sup>A,B</sup>

<sup>A</sup>Quantum Nano-Technology Laboratory, Konan University

<sup>B</sup>Faculty of Science and Engineering, Konan University

<sup>C</sup>NTT Basic Research Laboratories, NTT Corporation

### Abstract

The magnetic field dependence of electron spin g-factor has been investigated in GaAs / AlGaAs quantum wells. We have estimated the electron g-factor from spin precession frequency in time-resolved photoluminescence measurements under a magnetic field in different configurations; the magnetic field perpendicular ( $g_{\perp}$ ) and parallel ( $g_{\parallel}$ ) to the quantum confinement direction. When the angle between the magnetic field and the confinement direction is  $45^{\circ}$ , we have found dependences of the g-factor on the direction of magnetic field and the circular polarization type of excitation light ( $\sigma^{+}$  or  $\sigma^{-}$ ). These dependences of g-factor exhibit main features of Overhauser effect that the effective nuclear magnetic field effects on electron spin precession. The value of  $g_{\perp}$  and  $g_{\parallel}$  corrected for the nuclear effects agree well with the results of four-band  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  perturbation calculations.

### 1. はじめに

半導体構造におけるスピンと磁場との相互作用を記述する Landé の電子 g 因子は、基礎物理学的関心のみならず、量子情報通信等への応用に向けても研究が盛んに行われてきている[1-7]。量子井戸における電子 g 因子は量子閉じ込め構造を反映した異方向性を持つ[2-9]。電子 g 因子のうち、量子閉じ込め構造と垂直な方向成分 ( $g_{\perp}$ ) は Voigt 配置において、フォトルミネッセンス (PL) 測定[2, 7]や光学非線形性を利用したポンプ - プロブ法によって測定することができる[3-6]。磁場が閉じ込め方向に平行に印加されたときの電子 g 因子 ( $g_{\parallel}$ ) を正確に求めるには、閉じ込め方向と磁場の印加方

向が  $45^{\circ}$  をなす配置で実験を行う必要がある[3]。

本論文では GaAs / AlGaAs 量子井戸において測定された電子 g 因子 ( $g_{\perp}$ ,  $g_{\parallel}$ ) の井戸幅依存性を  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動計算による結果と比較する。また、 $45^{\circ}$  配置において観測された、核磁場が電子 g 因子に与える影響[3-5]についても議論を行う。

### 2. 実験

実験には  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As} / \text{GaAs}$  量子井戸を用い、これを円偏光のピコ秒パルスで励起し、スピン歳差運動をストリークカメラを用いて PL 時間分解測定することにより観測した。光源にはチタンサファイアレーザ

一を用いた。励起エネルギー1.8eV、励起パワー密度  $5\text{kW}/\text{cm}^2$ 、繰り返し周波数 80MHz であり、測定は 4 K において行った。PL の時間変化は発光ピーク周辺を積算して求めた。磁場と閉じ込め方向が  $45^\circ$  または  $135^\circ$  をなすような配置を採用して測定を行った。図 1 に井戸幅 15nm の量子井戸の測定により得られた歳差運動周波数を印加磁場の関数として黒丸で示す ( $\sigma^+$  円偏光励起)。歳差運動周波数は印加磁場の大きさに比例し、その比例係数は磁場極性の方向 (+ または -) に依存して異なる。また、励起円偏光を  $\sigma^+$  から  $\sigma^-$  に変化させると、磁場極性依存性が反転する。これらの比例係数より  $45^\circ$  配置における電子 g 因子  $g_{45}$  を求めた。

図 2 に電子 g 因子の井戸幅依存性を示す。ここでは  $\sigma^+$  円偏光を励起光として用いた。

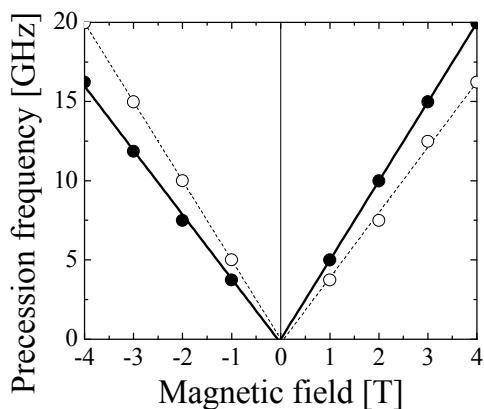


図 1 印加磁場に対する観測された歳差運動周波数。試料は井戸幅 15nm の GaAs / Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 量子井戸。+ と - 符号は磁場極性の向きを示す。黒丸と白丸はそれぞれ励起円偏光が  $\sigma^+$  と  $\sigma^-$  の場合の測定結果。

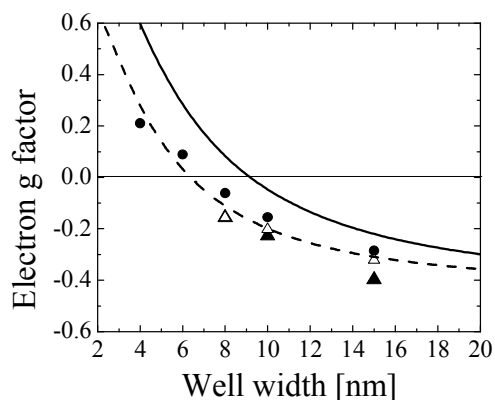


図 2 観測された  $g_{\perp}$  (丸) と  $g_{\parallel}$  (三角形) の GaAs / Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 量子井戸の井戸幅依存性。  $g_{\parallel}$  に対しては異なる磁場極性方向 + と - に対して得られた二つの結果をそれぞれ、黒と白の三角形で示した。実線と破線は 4 バンドの  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動法により得られた  $g_{\perp}$  と  $g_{\parallel}$  の計算結果。

黒丸は Voigt 配置で得られた  $g_{\perp}$  [7] を示しており、これには磁場極性の依存性は観測されなかった。  $g_{\parallel}$  の値は、この  $g_{\perp}$  の値と  $g_{45}$  の値から  $g_{\parallel}^2 = 2g_{45}^2 - g_{\perp}^2$  という関係式を用いて求めた[3]。黒と白の三角形はそれぞれ、磁場極性が + と - 方向の場合の  $g_{\parallel}$  値である。  $g_{\parallel}$  値の磁場極性依存性は井戸幅が大きくなるほど顕著に現れた。

$g_{45}$  の励起円偏光および磁場極性依存性の物理的起源を調べるため、スピン歳差運動周波数の時間的変化の測定を行った。図 3 に +3T の磁場を印加し測定した、ピコ秒オーダーの PL の時間変化を示す。点線は励起円偏光を  $\sigma^+$  から  $\sigma^-$  へ変化させてすぐに測定を開始し、2.5 分間積算して得られた結果である。破線と実線はそれぞれ励起偏

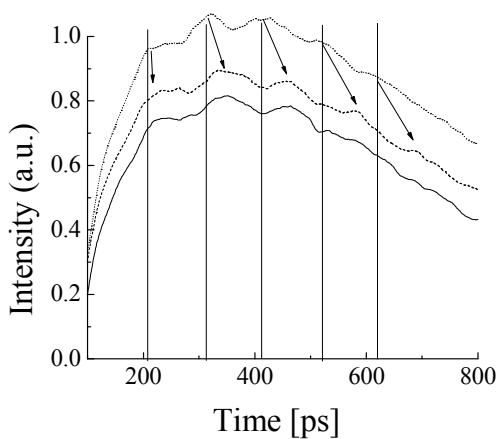


図 3 励起円偏光を  $\sigma^+$  から  $\sigma^-$  へ変化させた直後 (点線)、10 分後 (破線)、20 分後 (実線) の時間分解 PL の特徴。積算時間は 2.5 分、印加磁場は +3T。

光変化後 10 分と 20 分が経過した後に行った同様の測定結果である。測定の間は常に試料へ励起光を当て続けた。偏光変化直後 (0 分後) から 10 分後の歳差運動の振動波形には明らかな違いが観測できたが、10 分後と 20 分後の結果における変化は見られなかった。歳差運動による振動は 2.5 分間の積算の間に平均化されずに残っているので、この効果は数分よりも長いオーダーの応答時間を持つと考えられる。

### 3. 考察

一般に、電子  $g$  因子に影響を与える効果は電子核スピンの効果と電子間の交換相互作用がある。Overhauser 効果によってそろえられた核スピンは超微細相互作用を介して電子  $g$  因子に影響を与える[3-6]。45° 配置のような傾いた配置では電子スピンは円錐を描くように歳差運動を行う。このような場合、印加磁場に平行な電子スピンの平均成分  $S_{\parallel}$  はスピン歳差運動が続く限り常

に存在する。この平均成分と核スピン間の超微細相互作用  $A\mathbf{I}\cdot\mathbf{S}_{\parallel}$  により核スピンの平均的な核スピン  $\langle\mathbf{I}\rangle$  が形成される。これが電子スピンに有効磁場  $\mathbf{B}_N = A\langle\mathbf{I}\rangle/g_e\mu_B$  として働き、電子スピンの感じる合計の磁場が変化する。ここで  $\mu_B$  はボーア磁子である。井戸幅 15nm の量子井戸のように、電子  $g$  因子  $g_e$  が負で超微細相互作用係数  $A$  が正の場合、有効磁場の向きは核スピンと反平行になる。図 1 の + 磁場領域で見られる、励起円偏光を  $\sigma^+$  から  $\sigma^-$  へ変化させたときに生じる歳差運動周波数の減少は、この有効磁場の特徴をよく現している。Overhauser 効果による核スピン偏極の形成時間は数分から数十分程度であることが報告されている[3, 4]。本測定で観測された歳差運動の振動の変化もこの時間オーダーであった。

ここで簡単に電子間の交換相互作用が電子  $g$  因子に与える影響を議論する。密度行列法を用いてスピン交換相互作用による二つの電子系間の相互作用を理論的に解析した。二つの電子系はお互いに相互作用を及ぼし合い、スピン歳差運動の時間変化を変調させることが分かった。しかし、スピン系全体の平均的なスピン歳差運動を考える場合は、交換相互作用によってはスピン歳差運動の時間変化は変調を受けないことが分かった。このことは角運動量保存則によっても説明できる。したがって、本実験におけるスピン歳差運動測定では交換相互作用の影響を考える必要は無い[11]。

井戸幅の小さい量子井戸において核磁場

の効果が小さい理由は、電子スピンの寿命が短いからであると考えられる。核による磁場が形成されるには、どれだけの時間、電子スピンの存在するかが重要だからである。核磁場の効果を除外した  $g_{\parallel}$  を得るには、土の磁場においてそれぞれ求めた  $g$  因子の値を平均することにより求められる。GaAs バルクの試料からも土それぞれの磁場方向の実験により異なる  $g_{\parallel}$  の値を得たが、平均値は  $-0.44$  であり Voigt 配置から得られた GaAs バルクの  $g$  因子の値と一致した[8, 10]。

最後に、電子  $g$  因子の異方性について議論する。4 バンドの  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動法により計算した結果[8, 9]を図 2 の実線 ( $g_{\perp}$ ) と破線 ( $g_{\parallel}$ ) で示す。実験結果の傾向を良く再現する解析結果を得ることができた。量子井戸における電子  $g$  因子の異方性は、 $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動による価電子帯と伝導帯間のスピン依存した結合効率の違いに起因していると考えられる[8]。

#### 4. まとめ

GaAs / AlGaAs 量子井戸における電子  $g$  因子の磁場依存性を時間分解 PL 測定により議論した。45° 配置において、印加磁場の極性または励起光の円偏光によって電子  $g$  因子が変化することがわかった。これらの電子  $g$  因子の依存性は Overhauser 効果により説明できる。核磁場の効果を考慮し、これを除外した  $g_{\perp}$  と  $g_{\parallel}$  の値は 4 バンドの  $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$  摂動法により得られた結果によく一致した。45° 配置のような傾いた配置においては、ポンプ - プロブのような非線形測定の場合のみならず、PL 測定においても核磁場の効果を考慮する必要がある。

#### 参考文献

- [1] M. J. Snelling, E. Blackwood, C. J. McDonagh, R. T. Harley, and C. T. B. Foxon, Phys. Rev. B **45**, 3922 (1992)
- [2] R. M. Hannak, M. Oestreich, A. P. Heberle, W. W. Ruhle, and K. Kohler, Solid State Commun. **93**, 313 (1995).
- [3] A. Malinowski and R. T. Harley, Phys. Rev. B **62**, 2051 (2000).
- [4] G. Salis, D. T. Fuchs, J. M. Kikkawa, D. D. Awschalom, Y. Ohno, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. **86**, 2677 (2001).
- [5] G. Salis, D. D. Awschalom, Y. Ohno, and H. Ohno, Phys. Rev. B **64**, 195304 (2001)
- [6] H. Sanada, S. Matuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, Phys. Rev. B **68**, 241303 (2003).
- [7] T. Ito, W. Shichi, S. Morisada, M. Ichida, H. Gotoh, H. Kamada, and H. Ando, Phys. Stat. Sol. (c) **3**, 3496 (2006).
- [8] E. L. Ivchenko and A. A. Kiselev, Fiz. Tekh. Poluprovodn. **26**, 1471 (1992) [Sov. Phys. Semicond. **26**, 827 (1992)].
- [9] W. Shichi, T. Ito, S. Morisada, Y. Nishioka, M. Ichida, and H. Ando, Mem. Konan Univ. Sci. & Eng. Ser., **53**, 97 (2006).
- [10] H. Kosaka, A. A. Kiselev, F. A. Baron, K. W. Kim, and E. Yablonovichi, Electron. Lett. **37**, 464 (2001).
- [11] 詳細は第 18 回光物性研究会論文集「電子 - 電子相互作用がスピン歳差運動に与える影響 志智亘他」を参照。