

半導体量子井戸における電子スピン g 因子の量子閉じこめ依存性

志智亘¹, 伊藤哲², 森定慎介¹, 西岡愛恵¹, 市田正夫^{1,2},

後藤秀樹³, 鎌田英彦³, 安藤弘明^{1,2}

¹ 甲南大学大学院自然科学研究科, ² 甲南大学量子ナノテクノロジー研究所

³ NTT 物性科学基礎研究所

Quantum confinement dependence of electron g-factor in semiconductor quantum well structures

W. Shichi¹, T. Ito², S. Morisada¹, Y. Nishioka¹, M. Ichida^{1,2}

H. Gotoh³, H. Kamada³, and H. Ando^{1,2}

¹*Faculty of Science and Engineering, Konan University*

²*Quantum Nano-Technology Laboratory, Konan University*

³*NTT Basic Research Laboratories NTT Corporation*

Abstract

The effects of quantum confinement on electron spin g-factor have been investigated in lattice-matched GaAs/AlGaAs quantum well (QW) and strained InGaAs/GaAs QW. We demonstrate how the spin precession frequency changes depending on the GaAs well width and the indium fraction in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ well by time-resolved photoluminescence measurements under a high magnetic field. The g-factor values obtained by the spin precession measurements are compared with calculation method proposed by Ivchenko. The calculation results agree with our experimental results in lattice matched QW. In addition to this calculation, we have examined a different approach to the calculation of g-factor. It is found that the $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ calculation exhibits good agreement with experimental trends both in the unstrained and strained QW system.

1.はじめに

III-V 族閃亜鉛鉱型半導体において, 結晶の周期構造に起因する $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 摂動により伝導帯である Γ_6 状態と価電子帯である Γ_7, Γ_8 状態が混ざり込むことが知られている. このことは電子の光学特性, 伝導性および磁性などに影響を及ぼす. 量子井戸や量子ドットなどの量子構造を導入することは伝導帯や価電子帯の Bloch 関数や固有エネルギーを変化させ, 半導体の基本的な性質を変える. これらの性質の中でも特に Landé の g 因子は量子閉じこめ効果による影響を受けやすいものの一つである. 従って, 量子構

造により閉じこめられた電子のスピン g 因子の正確な測定を行うことで多くの情報を提供できることが期待される. スピン g 因子の量子閉じこめ効果を明らかにするためのたくさんに研究がなされてきた[1,2]. 量子井戸におけるスピン g 因子の井戸幅依存性や縦方向成分や横方向成分といった異方性について測定されている[2]. また, 理論的に異方性の実験結果を説明するための研究がなされてきた[1]. Ivchenko と Kiselev らにより提案された 8 バンド近似の理論は Kane 流の $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ 摂動を元にバルク半導体を計算し, 高次の摂動補正項をとおして量子

閉じこめ効果を表現している[1]. 今回我々は、格子整合系量子井戸および歪系量子井戸における電子スピン g 因子の実験と計算を行った. 実験は, Voigt 配置で円偏光のフォトルミネッセンス (PL) の時間発展を測定することにより, 電子スピンの歳差運動に関わる電子 g 因子の横成分 ($g_{\perp}$) を見積もった. 計算においては Ivchenko らの方法をもとに $g_{\perp}$ を求めるとともに上述とは異なるアプローチで $g_{\perp}$ を求める方法を検討した. また, 実験結果をこれらの二つの方法より求めた計算結果と比較した.

2.実験方法

格子整合系量子井戸における測定に使用した試料は異なる井戸幅を含んでおり, 閉じこめ効果の井戸幅依存性を同じ条件で測定することができる. また, この試料は井戸層として GaAs, バリア層として $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ を含んでいる. 電子スピン歳差運動を観測するために, 4 K で Voigt 配置における 10T までの強磁場で, ストリークカメラを用いて時間発展 PL 測定を行った[3]. 実験では量子井戸の試料に波長 700 nm で 2 ps のパルスレーザーを用いて照射した. PLにおける円偏光成分 σ^+ および σ^- は $\lambda/4$ 板および偏光板を利用し, 選択測定を行った.

歪系量子井戸における試料は, 井戸層が $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, バリア層が GaAs で構成されており, 井戸幅は 12 nm である. また, In の含有量が 0.1 と 0.05 の試料を利用することにより電子 g 因子の In 含有量依存性を測定した. 測定には格子整合系と同様の方法で行った.

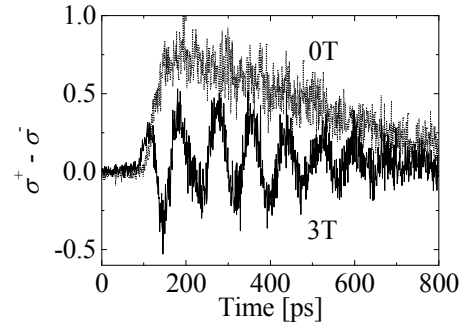


図 1. $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子井戸の井戸幅 15[nm]における歳差運動の $\sigma^+ - \sigma^-$ で定義される光学異方性の時間発展.

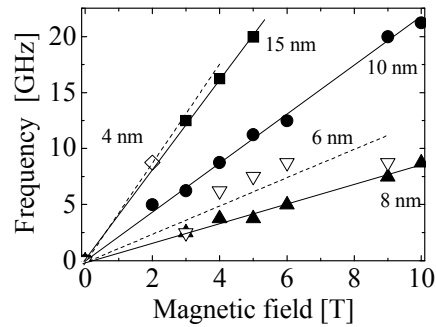


図 2. $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子井戸における歳差運動の振動数の井戸幅依存性.

3.実験結果

図 1 に井戸幅が 15 nm の量子井戸において得られた $\sigma^+ - \sigma^-$ で定義された光学異方性の時間発展を示す. 図 1 の点線は印加磁場なしの光学異方性の時間発展である. 実線は磁場印加時における光学異方性の時間発展であり, 電子のスピン歳差運動による振動をみることができる. この PL の時間発展における振動から電子スピンの歳差運動の振動数を見積もった. 図 2 はそのようにして求めた各井戸幅に対する振動数の磁場依存性である. 印加磁場が大きくなるに従って振動数がそれに比例して増加している様子がわかる. このとき, それぞれの比例係数より電子 g 因子を得ることができる.

4. 計算方法

まず, Ivchenko らにより提案された 8 バンド近似による計算方法について述べる. 量子井戸における閉じこめ方向と磁場の方向が平行であるときの電子 g 因子 ($g_{\parallel}$) は

$$g_{\parallel} = g_w \int |\phi_w|^2 dz + g_b \int |\phi_b|^2 dz \quad (1)$$

$$g_{w,b} = g_{w,b}^{(0)} + \Delta g k_{w,b}^2$$

と表現される. ここで, $\phi_{w,b}$ は各層の波動

関数, $g_{w,b}^{(0)}$ は各層のバルク半導体における

電子 g 因子の値, そして $k_{w,b}$ は井戸構造における電子の波数である. Δg は閉じこめエネルギーの変化に伴う補正項で, 3 次と 4 次の $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 摂動を計算することにより求めることができる. また, 電子 g 因子の横成分 ($g_{\perp}$) は次の関係式より求められる.

$$g_{\parallel} - g_{\perp} = 2 \frac{P_{cv}^2}{m_0} \left(\frac{1}{E_g + \delta_e + \delta_{hh}} + \frac{1}{E_g + \delta_e + \delta_{lh}} \right) \quad (2)$$

ここで, m_0 は電子質量, $\delta_e, \delta_{hh}, \delta_{lh}$ は電子, 重い正孔そして軽い正孔の閉じこめエネルギーである. $P_{cv} = \langle iS | p_z | Z \rangle$ は運動量演算子のバンド間行列要素である.

次に, 電子 g 因子を異なるアプローチで求める方法について述べる[4]. この方法は, 強い閉じこめを仮定し, 各バンドにおける閉じこめ状態の最低エネルギー状態を利用し 2 次の $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ 摂動計算を行う. この結果, 電子 g 因子の横成分 ($g_{\perp}$) は

$$g_{\perp} = g_0 + \frac{2}{3} \frac{P_{cv}^2}{m_0} \left(-\frac{2}{E_g + \delta_e + \delta_{lh}} + \frac{2}{E_g + \delta_e + \Delta + \delta_{so}} \right) \quad (3)$$

となる. ここで, $g_0, E_g, \Delta, \delta_{so}$ はそれぞれ

自由電子の g 因子 ($g_0 \approx 2$), 井戸層の材料のバンドギャップ, 井戸層の材料の価電子帯上端とスピン分離帯上端のエネルギーギャップ, スピン分離帯の閉じこめエネルギーである.

歪系の量子井戸における電子 g 因子は, 伝導帯および価電子帯における歪による効果を考慮したエネルギー構造を元に, 上述した方法を用いて求めることができる[5].

5. 計算結果と考察

図 3 に (a) 格子整合系量子井戸である井戸層が GaAs, バリア層が $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ の $g_{\perp}$ の井戸幅依存性, (b) 歪系量子井戸である井戸層が $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, バリア層が GaAs の $g_{\perp}$ の In 含有量依存性を示す. 各図の黒丸は図 2 の傾きより求めた $g_{\perp}$ である. 破線は Ivchenko らの方法により求めた $g_{\perp}$ であり, 実線は式(3)で求めた $g_{\perp}$ である. ここで, 電子 g 因子を計算するにあたり各式における $2P_{cv}^2/m_0$ の値は各層における材料のそれらを電子の存在確率で重み付けしたものを利用した. 各材料の $2P_{cv}^2/m_0$ の値はこれらの電子 g 因子が分かっているので, これを元に次式から逆算することにより求めた[6].

$$g = g_0 - \frac{4}{3} \frac{P_{cv}^2}{m_0} \frac{\Delta}{E_g(E_g + \Delta)} \quad (4)$$

ここで, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の各材料の $2P_{cv}^2/m_0$ の値は GaAs の値と, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ の値を比例配分することにより求めた. また, 式(3)の閉じこめエネルギーの値は, 有限の深さの量子井戸として求めた値を利用した.

図 3 の点線は GaAs バルクにおける電子 g 因子 (−0.44) および $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ バルクにおける電子 g 因子 (0.5) である[1,6]. 図(a)では実験結果および二つの計算結果は

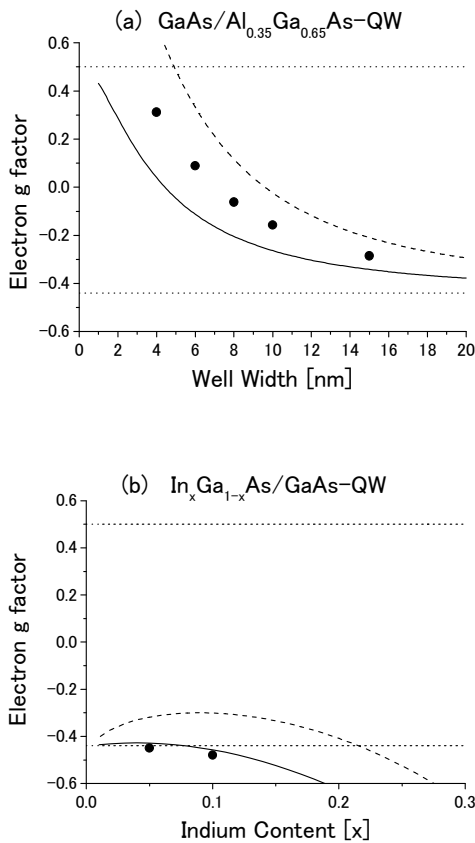


図 3. 量子井戸構造における電子 g 因子の横方向成分の井戸構造依存性. 黒丸は測定値, 実線は式(3)より求めた計算結果, 破線は式(1),(2)より求めた計算結果. (a)は格子整合系量子井戸の井戸幅依存性, (b)は歪系量子井戸の In 含有量依存性.

ともに, 井戸幅が狭くなるに従って $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ の電子 g 因子の値に近づいており, 井戸幅が広がるにつれて GaAs の電子 g 因子の値に近づいていくことがわかる. 計算結果もこのような傾向を再現している. 一方, 図(b)において, In 含有量がわずかなところでの実験結果はほぼ GaAs の電子 g 因子の値と変わらなかった. 計算結果においては式(3)によるものは実験結果の傾向を再現した.

6.まとめ

今回我々は, 格子整合系量子井戸および歪系量子井戸における横方向電子 g 因子の構造依存性をスピン歳差運動を測定することにより求めた. また, 二つの計算方法を用いて実験結果と比較した. この結果, Ivchenko らの方法とは別のアプローチで求めた電子 g 因子は実験結果の傾向を再現することがわかった. 今後は, 他の材料系における電子 g 因子の測定を行い, また, 式(3)の計算方法により測定結果と比較していきたい.

参考文献

- [1] E. L. Ivchenko and A. A. Kiselev, Sov. Phys. Semicond. **26**, 827 (1992).
- [2] R. M. Hannak, M. Oestreich, A. P. Heberle, W. W. Rühle, Köhler, Solid State Commun. **93**, 313 (1995).
- [3] A. P. Heberle, W. W. Rühle, K. Ploog, Phys. Rev. Lett. **72**, 3887 (1994).
- [4] Eougenious L. Ivchenko "Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures" (Alpha Science International Ltd. Harrow, U.K, 2005)
- [5] S. L. Chuang, "Physics of Optoelectronic Devices (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995).
- [6] H. Kosaka, A. A. Kisely, F. A. Baron, K. W. Kim, and E. Yablonovich, Elecron. Lett. **37**, 464 (2001).