CCD 分光器を利用した偏光分光法による GaAs/AlGaAs 量子井戸の広帯域な電子 g 因子の評価

菅田悠^A、谷垣昇吾^A、伊藤哲^B、市田正夫^A、安藤弘明^A

^A甲南大学大学院自然科学研究科

^B静岡大学若手グローバル研究リーダー育成拠点

Measurements of electron g-factor in GaAs/AlGaAs Quantum-Well

by polarization spectroscopy using a CCD spectrometer

H.Sugata^A,S.Tanigaki^A,T.Ito^B,M.Ichida^A,H.Ando^A

^AGraduate school of Natural Science, Konan University ^BDivision of Global Research Leaders, Shizuoka University

Hanle effect measurements have been conducted using a CCD spectrometer to evaluate the electron g-factor in GaAs/AlGaAs quantum wells (QWs). Since the CCD spectrometer can detect photoluminescence (PL) signal in a wide wavelength range, it is possible to simultaneously evaluate electron g-factor values in various QWs with different well thickness. In the experiment it was found that the change of degree of polarization in PL signal inducted by external magnetic field is larger in a QW having thicker well. Assuming the spin relaxation time is almost the same independent of the well thickness, these experimental results reflect the dependence of the electron g-factor on the well thickness. Hanle effect measurements using a CCD spectrometer offers an efficient way to grasp the trend in the dependence of electron g-factor on quantum confinement.

1. はじめに

Hanle 効果は、円偏光で励起した試料か らのフォトルミネッセンス(PL)の偏光度が 印加磁場によって変化する現象であるが、 これは試料中の電子スピンが磁気モーメン トを持つことに起因する[1]。半導体に光を 照射すると電子が価電子帯から伝導帯へと 励起されるが、その電子スピンは励起光の 偏光状態と密接な関係がある。半導体に円 偏光を照射した場合、励起された電子のス ピンは一方に偏った状態、すなわちスピン 偏極を起こす。電子が正孔と再結合すると 電子スピンに対応した円偏光が放出される。 試料に磁場を印加すると、光励起された電 子のスピンは歳差運動を行なうため、印加 磁場の大きさにより発光の偏光が変化する (Hanle 効果)ことになる。

電子スピンにおいて磁気モーメントは重 要な特性である。電子スピンの磁気モーメ ントの大きさは、スピン角運動量と磁気モ ーメントを結びつける係数であるランデg
因子(電子g因子)が使われる[2]。実験では
試料に磁場を印加することによってスピン
歳差運動が観測されるが、このスピン歳差
運動の周波数(Larmor周波数)と印加磁場
を結びつける係数が電子g因子である。

本研究では GaAs/AlGaAs 量子井戸の電 子 g 因子を測定するため、Hanle 効果に着 目し測定系を構築した。これまで電子 g 因 子を測定するためには、高度で複雑な実験 系が必要であった。CCD 分光器を用いた Hanle 法は、広い波長範囲で PL 信号を検 出することができるため、井戸幅の異なる 複数の量子井戸を同時に評価することが可 能である。

2. 試料と測定方法

試料は GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 量子井戸構造 を用いた。図 1 に試料の模式図を示す。試 料は GaAs 基板の上にバッファー層として 300nm の GaAs が積層され、その上に AlGaAs と GaAs が交互に積層されている。 GaAs 層の厚さを変えて 5 つの量子井戸を 作製しており、井戸幅は 3, 4, 6, 10, 15(nm) である。

図 2 に今回構築した測定系を示す。光源 は Ti-Sapphire パルスレーザ(波長 735nm) を使用し、試料照射時の励起光強度は 1mW とした。励起光は λ/4 波長板で円偏光に変 換して試料に照射する。励起に円偏光を用 いることで、試料中の励起電子はスピン偏 極した状態になる。PL は右回りと左回り円 偏光が混合した状態であるが、途中の λ/4 波長板で直交した 2 つの直線偏光に分けら れる。それを検光子によって一方の直線偏 光を抽出し観測することにより、PL の右回



図 2 測定系

り(I_R)または左回り円偏光(I_L)の一方を任意 に観測することができる。今回構築した測 定系では PC によって CCD 分光器と λ /4 波長板の回転ステージを同時に制御し、広 い波長範囲で一挙にスペクトル測定が行え ることが特徴である。 λ /4 波長板を 0°,90°と交互に回転させながら CCD 分 光器でスペクトルを測定し、その光強度差 (I_R-I_L)をとった。試料内にスピン偏極が起 こっていると、PL は一方の円偏光が強く放 出される。つまり、PL の各偏光強度の差 (I_R-I_L)を求めることにより、スピン偏極の 度合いがわかる。

なお、試料はヘリウムガス循環型クライ オスタットを利用して 4K まで冷却し、フ ォークト配置で実験を行った。試料に印加 する磁場は 0T から 2T まで変化させた。

実験結果と考察

図 3 は印加磁場 0T の場合の PL スペク トルである。複数のピークが見られるが、 これは井戸幅の異なる量子井戸からの発光、 または GaAs バッファー層からの発光であ る。それぞれの量子井戸からの発光は十分 に分離され観測されている。

図 4はPLの偏光強度の差(IR-IL)である。 OT では全ての発光帯においてスピン偏極 が見られるが、磁場の印加にともなって、 より大きな井戸幅の IR-IL が減少していく。 井戸幅 10nm,15nm の IR-IL は 0.3T でほぼ 0 となり、同様に 6nm は 1.0T、4nm は 1.5T で 0 となった。この変化の原因を明らかに するため、IR-ILを波長 760nm~825nm で積 分した。その結果を図 5 に示す。磁場強度 の増加とともに IR-IL が減少するが、これは 電子スピン歳差運動の Larmor 周波数が増 加することに起因する。すなわち Larmor 周波数が高いほど電子スピンの向きが速く 変化するため、電子の上向きと下向きのス ピン偏極が平均化され、IR-IL は 0 に近づく。

Larmor 周波数fは印加磁場Bに比例し

$$f(B) = \frac{\mu_B}{\hbar} gB$$

という関係がある。ここで μ_B はボーア磁子、 gは電子 g 因子である。gは比例係数である から、電子 g 因子が大きいほど Larmor 周 波数が高くなる。すなわち、実験において 磁場Bを OT から増加させた時、 I_R - I_L は電子 g 因子が大きい量子井戸の発光から減少し ていくことになる。

図 6は各量子井戸における偏光強度の差 (I_R-I_L)の磁場依存性であるが、磁場が増加 するに従って幅が広い量子井戸から順に I_R-I_Lが減少していることが分かる。スピン



図 3 GaAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 量子井戸からの PL スペクトル





緩和時間は量子井戸の幅によらず一定であ ると仮定すると、この結果は電子 g 因子の 井戸幅依存性が反映されていると考えられ る。すなわち、幅が広い量子井戸の電子 g 因子は大きく、井戸幅が狭くなるとともに 電子 g 因子は減少することがわかる。図 7 はこれまでに我々のグループがストリーク カメラを用いて PL の時間分解測定により 求めた電子 g 因子の井戸幅依存性を示す。 井戸幅が大きいほど電子 g 因子が増大する という傾向は今回の実験結果と一致してい ることがわかる[3,4]。

4. まとめ

CCD 分光器を用いて、試料からの偏光分 解 PL 測定系を構築し、GaAs/AlGaAs 量子 井戸の電子 g 因子を評価した。これにより、 量子井戸における電子 g 因子の井戸幅依存 性についての知見が得られることを明らか にした。

今回構築した測定系は CCD 分光器を用 いることにより広い波長範囲で PL スペク トルを測定できるため、異なる井戸幅にお ける複数の量子井戸の電子 g 因子を同時に 測定することが可能となる。簡便な測定系 で電子 g 因子の構造依存性の傾向を把握す るには有効な手段である。

参考文献

 S.V.Andreev *et al*, Phys. Rev. B **80**, 113301 (2009)

[2] F.Meier, et al, Optical Orientation(North-Holland, Amsterdam, 1984)

[3] T.Ito, *et al*, J Lumin 128, 865-867 (2008)

[4] T.Ito, *et al*, Phys. stat. sol. (c) 3, No.10, 3496-3499 (2006)



図 5 PL 偏光強度の差(I_R-I_L)を波長 760~825nm で積分した磁場依存性。







