

## 光半導体におけるスピン状態制御

### [1] 組織

代表者：後藤 秀樹  
(NTT 物性科学基礎研究所)

対応者：伊藤 哲  
(静岡大学電子工学研究所)

### [2] 研究経過

本プロジェクトでは、代表者と対応者との間で行われている共同研究「光半導体におけるスピン光学効果とメモリ応用」の促進と発展を目標に研究を行った。

具体的には、電子及び正孔スピンの量子ビット応用を目指し、その基礎的研究として、光学的手法によるスピン重ね合わせ状態の生成・緩和と量子構造の関係を実験的に解明するとともに、スピンを量子ビットとして利用する際に必要不可欠となるスピン状態制御の実証を行った。

スピン状態操作の実証で最も重要な点は (1) 異なる方向に2つのスピン系を励起し、(2) それらを区別して観測することである。また、これらを実現するために (3) 正孔スピンと電子スピンの重ね合わせ状態の実現が重要である。

直線偏光は円偏光の重ね合わせであるので、上向きスピンと下向きスピンの重ね合わせを生成できる。これにより、円偏光で形成した操作したいスピン1に対して垂直方向のスピン2が形成されたことになり、上記(1)の条件を達成できる。ただし、重ね合わせ状態は壊れやすいので、(3)の条件を満たすために共鳴励起に近い条件での励起した。測定にはPL時間分解測定及び、ポンププローブ非線形時間分解測定(カー回転)法を用いた。申請した諸経費で、静岡大学で行うこれらの実験のための消耗品費を購入した。

またこれら実験に平行して、半導体のバンド構造解析を行い、光の偏光状態と電子・正孔の遷移メカニズムを解明し、効率的にスピン回転を起こすための光励起条件を解析した。

### [3] 成果

#### (3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

まず第1に、直線偏光励起による偏光時間分解PL測定を行い、スピン重ね合わせ状態の励起エネルギー及び励起パワー密度による変化を議論した。井戸幅4, 8, 12 nmのGaAs/AlGaAs多重量子井戸(MQW)を測定に用いた。直線偏光レーザーパルス(時間幅2 ps)をMQW試料に照射しスピン偏極を形成し、ストリークカメラを用いて、偏光度(D.P. =  $(I+ - I-)/(I+ + I-)$ )の時間発展を、励起エネルギーを変化させ系統的に評価した。井戸幅8 nmのMQWを直線偏光励起した場合の18 Kにおける偏光度の時間変化を測定したところ、励起エネルギーに対して緩和時間は30 ps程度であったが、発光エネルギー(1.565 eV)から高エネルギー側に離れるにしたがって偏光度の初期値(ピーク値)は徐々に減少し、ゼロに近づくことが観測された。励起パワー密度を増加させたところ、緩和時間は減少した。これは励起キャリア密度が増加することにより、電子・正孔間に働く交換相互作用が増加しスピン緩和を促進させたと考えられる。また、井戸幅の増加に対してスピン緩和時間が減少することが分かった。これは円偏光励起の場合と逆の傾向である。井戸幅の増加によりLHとHH準位のエネルギー分裂量が減少し、バンド混合が増加したことにより、スピン緩和が促進されたものと考えられる。これらの結果はスピン重ね合わせ状態の解消・緩和にはLH状態が寄与していることを示唆している。図1にファラデー配置で磁場を印加した場合のスピン偏極度の時間変化を示す。ファラデー配置の磁場を印加することにより、直線偏光度が時間的に変動(歳差運動)したことから、直線偏光の起源がスピンであることを確認した。

第2に、PL測定よりも高精度な時間分解評価を行うために、ポンププローブ法測定系の構築を行い、円偏光、直線偏光におけるスピン偏極とその緩和時間の測定を行った。PL測定と同様に、円偏光励起(ポンプ)と直線偏光励起で異なる緩和時間が観測された。PL測定と対応したMQW試料を用いて、直線偏光励起のスピン緩和時間の比較・評価を行った。図2に緩和時間の井戸幅依存性を示す。励起パワー密度の増加により緩和時間が減少する点、量子

閉じ込め効果の増加（井戸幅の減少）により緩和時間が増加する点において、PL 測定と同様の傾向が観測された。また、観測された緩和時間は PL 測定で観測されたものと同程度であった。これらにより、ポンププローブ測定によってもスピン重ねあわせの緩和時間の評価が可能であることが分かった。

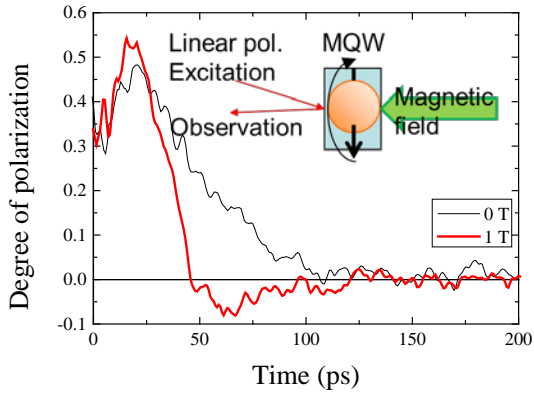


図1 スピン偏極度の時間変化

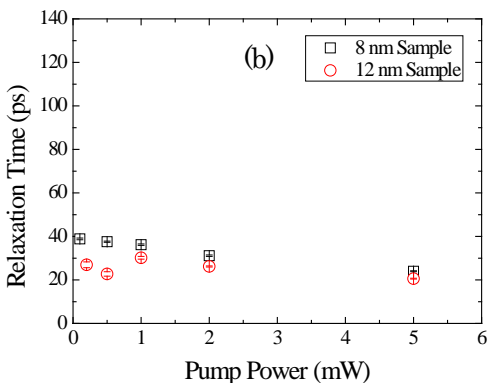
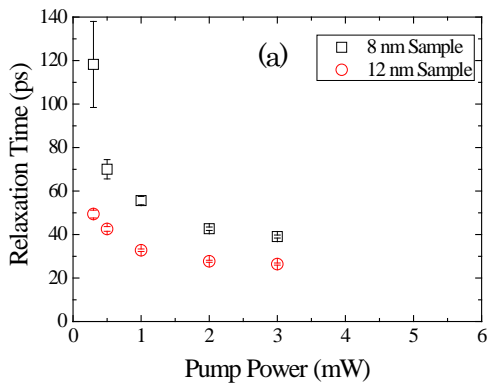


図2 (a)ポンププローブ測定と(b)PL 測定における緩和時間の井戸幅及び励起パワー依存性

(3-2) 波及効果と発展性など

今回観測されたスピン重ね合わせは正孔スピンの

寄与するものであり、これまで着目されてこなかった正孔スピン重ねあわせ状態の形成及び緩和を実験、理論の両面から解明することで、将来的なスピンの量子ビット応用をめざす上での重要な知見が得られた。特に、正孔スピンはブロッホ関数の対称性により半導体内の原子核スピンによる相互作用が無いいため、正孔スピン状態の制御が確立されれば、原子核スピンの影響を受けず、比較的長い時間スピン状態を保持できるため、量子メモリの実現が可能となる。また、電子スピンの重ね合わせ状態を直線偏光（円偏光の重ね合わせ）で制御し、光パルスにより円偏光励起の場合とは異なる方向に偏極させられることを示唆した。これにより形成された電子スピン間に働く相互作用起源の有効磁場を利用して、外部磁場無しでの電子スピン操作の可能性が示され、学術的な領域拡大も期待できる。また、半導体量子構造中でのバンド構造を  $k \cdot p$  摂動法により解析してきており、この知見を利用すればスピン重ねあわせ状態の形成・操作に適したバンド構造と光の偏光状態の関係が解明できる。これにより、利用できるスピン方向の自由度が向上し、光の偏光状態を電子スピン状態に転写する量子メディア変換技術等への波及効果も期待できる。また近年、スピン効果は MRAM への応用で注目を集めており、本成果はこのような新しい素子の動作原理としての発展も期待できる。

本申請共同研究により、すでに進行中の共同研究「光半導体におけるスピン光学効果とメモリ応用」の促進と、新たな共同研究への発展が期待される。

[4] 成果資料

(1) "Observation of Hole-Spin Superposition in GaAs Quantum Well under Magnetic Field" Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 2063

(2) "Evaluation of Spin Relaxation Time by Polarization- and Time-Resolved Pump and Probe Measurements" Soichiro Fuma, Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, 3rd International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, S1-P.49

(3) "Observation of hole-spin superposition in GaAs quantum well by time-resolved photoluminescence measurements" Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, and Hiroaki Ando, International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, PWe05

出張報告 無