

光半導体におけるスピン状態制御とメモリ動作

[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

スピンは電子や正孔などにおける電荷とは独立な自由度であり、半導体のみならず、生体中でも活性酸素に代表されるように、その働きが注目されている。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物性解明とメモリ動作の研究」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あわせ状態の生成・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あ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、重ねあ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。

これまでにストリークカメラを用いた PL 偏光時間分解測定を行い、直線偏光励起により、直線偏光 PL の起源は磁場測定からスピンであること、スピンの重ね合わせが形成されること及び、その重ね合わせには正孔スピンの状態が強く寄与していることを実験的に確認してきた。

本年度は、時間分解能がパルス幅で決まり、PL 測定よりも高いポンププローブ非線形時間分解測定

(カー回転) 法を中心に測定を行った。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。

[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ポンププローブ測定を行い、スピン重ねあわせ状態の井戸幅(量子閉じ込めエネルギー)依存性を測定し、PL 測定の結果と比較・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)をポンプ光として MQW 試料に照射しスピン偏極を形成し、縦偏光と横偏光の重ね合わせである斜め偏光のプローブ光の反射率測定を行うことにより、ポンプ光とプローブ光の時間遅延との関係から、偏光度 ($D.P. = (I+ - I-) / (I+ + I-)$) の時間発展を、井戸幅の異なる量子井戸に対して系統的に評価した。測定温度は 4 K でを行い、パルスの光子エネルギーは各井戸の発光エネルギーとした。図 1 に偏光度の時間発展から求めたスピン緩和時間の井戸幅依存性を示す。緩和時間は概ね 20 ps 程度であり、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。これらの傾向は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あわせ状態の解消・緩和には LH 状態が寄与していることを示唆している。また、これらの結果は PL 測定と同様の傾向であることが確認された。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。

第 2 に、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。図 2 に円偏光と直線偏光ポンプにおける緩和時間の井戸幅依存性を示す。直線偏光ポンプでは、井戸幅の増加(量子閉じ込めエネルギーの減少)とともにスピン緩和時間は減少したのに対して、円偏光ポンプでは増加した。直線偏光ポン

プでは上述の LH と HH 状態の混合効果がスピン緩和に対して支配的であるが、円偏光ポンプでは別の効果が支配的であることを示唆する結果を得た。円偏光ポンプでは純粋な上向きスピン状態が形成され、偏光の緩和は電子スピンの状態が反映されると考えられる。井戸幅が増加するに従って、量子閉じ込めエネルギーが減少し、大きな波数ベクトルを持つ電子が減少すると考えられる。これにより、電子スピンの向きによる波数ベクトルのエネルギー依存性（分散関係）の違いに起因するスピン緩和機構である Dyakonov-Perel 機構が抑制されるため、スピン緩和時間が増加したものと考えられる。このように、円偏光と直線偏光により形成されるスピン状態には大きな違いがあり、形成されたスピンが受ける緩和機構も異なることが実験的に明らかになった。

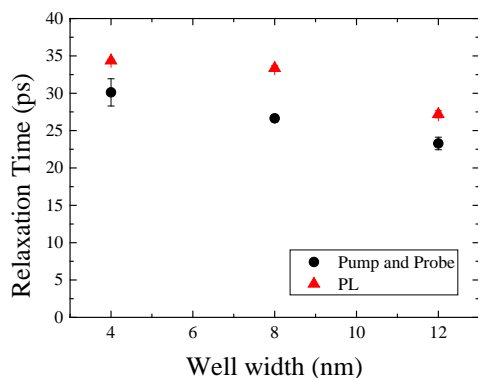


図 1. スピン緩和時間の井戸幅依存性。ポンププローブ (●) と PL 測定 (▲) の比較。

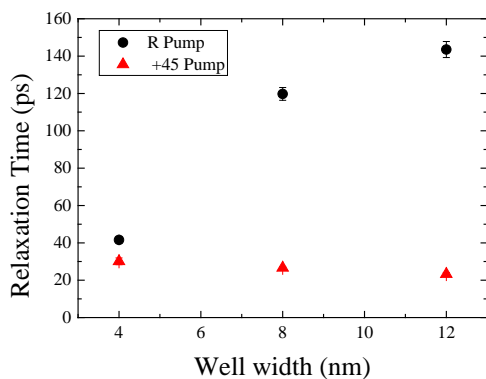


図 2. スピン緩和時間の井戸幅依存性。右回り円偏光 (●) と +45 度直線偏光ポンプ (▲) の比較。

(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合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、将来的なスピンをプローブとした生体応用、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ため、正孔スピン状態の制御が確立できれば、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。ポンププローブ測定によりこれらの解析が可能であることが確認できたため、PL 測定よりも時間分解能を高めることが出来る。ポンププローブ測定系に磁場装置を組み込み、スピン歳差運動を観測・解析することにより、正孔スピンの重ね合わせ状態に関する新たな知見が得られると期待できる。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合わせ状態の形成・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物性解明とメモリ動作の研究」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 Spin Superposition by Polarization- and Time-Resolved Pump and Probe Measurements", Soichiro Fuma, Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, Inter Academia 2016, Warsaw, Poland