

半導体ナノ構造における正孔スピン光物性

[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。

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に対して垂直方向のスピンの形成されたことになる。ただし、重ねあわせ状態は壊れやすいので、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。また、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い、PL 測定と同様の傾向であることが確認された。更に、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ところ、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。

る緩和時間が観測された。

本年度は、これら、円偏光、直線偏光ポンプで観測された偏極の起源を議論するために、緩和時間の温度依存性を測定した。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。

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。

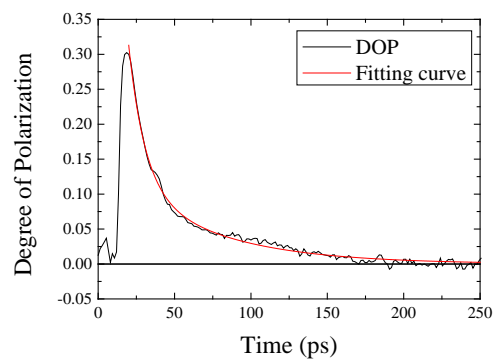


図1. 円偏光ポンプによる偏極度の時間変化。

図1に井戸幅 8 nm の MQW に対して、円偏光ポンプの場合の円偏光成分の時間変化を示す。2 段階の指数関数フィッティングを行ったところ、10 ps 程度の速い緩和成分と 40 ps 程度の遅い緩和成分が有ることが分かった。図2は 8 nm MQW を直線偏光ポンプした場合の直線偏光成分の時間変化である。

こちらは1段階の指数関数でフィッティングされ、緩和時間は6 ps程度であった。

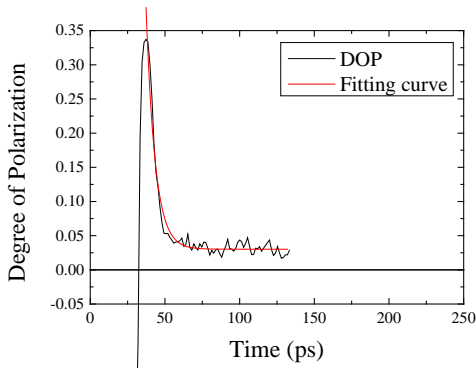


図2. 直線偏光ポンプによる偏極度の時間変化.

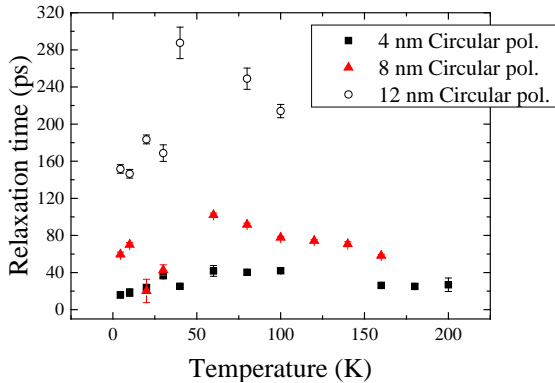


図3. 円偏光の遅い緩和成分の温度依存性. 井戸幅4 (■), 8 (▲), 12 nm (○) の比較.

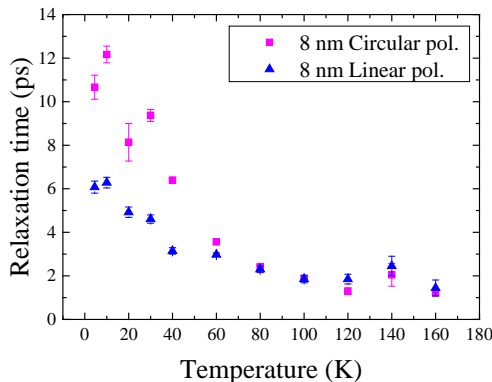


図4. 円偏光の速い緩和成分 (■) と直線偏光成分 (▲) の温度依存性.

図3に円偏光ポンプの場合の長い緩和成分の温度依存性を示す. 井戸幅4, 8, 12 nmのいずれのMQWにおいても, 50 K付近までは緩和時間は増加し, それ以上の温度では減少している. また, 井戸幅が増加(量子閉じ込めエネルギーが減少)すると緩和時間は増加した. 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)の違いが生じ, スピンが有効磁場を受け, スピン緩和が生じるという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. また, 温度の増加により散乱が増加し, 波数ベクトルの変化が速くなると有効磁場によるスピン緩和が抑制される為, 緩和時間が長くなると考えられる. これらの結果から, 円偏光ポンプにより生じる遅い偏光成分の起源は電子スピンであると考えられる.

図4に, 円偏光ポンプによる速い偏光成分と直線偏光ポンプによる偏光成分の温度依存性を示す. 図3の結果とは異なり, 低温領域から単調に緩和時間が減少していることから, 偏光の起源は電子スピンとは異なると考えられる. 正孔が存在する価電子帯ではバンドが近接しているためバンド混合が大きい. よって温度が上昇すると波数分布が広がり, スピン緩和が促進(EY機構)されていると考えられる.

(3-2) 波及効果と発展性など

今回観測測定した, 緩和時間の温度依存性から, 直線偏光でスピン重ね合わせが形成されていることが確認された. 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. 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. 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 electron- and hole-spin relaxation by pump and probe measurement under different excitation polarization", Hiroki Muramatsu, Tetsu Ito, Hideki Gotoh, Masao Ichida, Hiroaki Ando, The First Materials Research Society of Thailand International Conference, Chiang Mai, Thailand