



半導体量子構造における電子・核スピンドイナミクスの研究

非磁性半導体におけるスピントロニクスの展開

大野 裕三

東北大学 電気通信研究所
准教授

研究の背景

近年、半導体における電子や核のスピンの物性の基礎研究が発展するとともに、それを活用して新しい機能を実現しようとする研究“半導体スピントロニクス”が注目を集めている。半導体スピントロニクスの黎明期においては、非磁性半導体中にスピン偏極した電子をいかに生成するかということと、電子や核スピンの量子力学的

なコヒーレンスをいかに操作・検出する技術を確認するかが課題であった。我々はこれらを実現するため、①強磁性半導体/非磁性半導体ヘテロ構造を利用し、半導体への電気的スピン注入を初めて実験的に示すとともに、②非磁性半導体量子井戸における電子スピン緩和機構を明らかにするなど、電子・核スピンドイナミクスについて先駆的な研究を行ってきた。以下にその成果の概要を記す。

研究の成果

1. 電気的スピン注入

強磁性半導体を用いることにより、スピンの揃ったキャリアを注入して発光の偏光を制御する新しい発光素子を作製し、半導体中を流れる電流のスピン偏極を検出することにはじめて成功した^[1]。強磁性でありかつp型の伝導を示す(Ga,Mn)Asと非磁性のGaAsおよび(In,Ga)Asをn型GaAs基板上に積層したpn接合発光ダイオードを作製し(図1a)、その出射光の偏光度を磁場中で調べたところ、(Ga,Mn)Asの強磁性転移温度以下でヒステリシスを観測した(図1b)。出射される光の右回りと左回りの円偏光の強度比は、注入されるキャリア(電子と正孔)のスピン方向に応じて決まるので、観測された偏光は電流を担う正孔のスピンが偏極していることを示している。本研究で提示した手法は、強磁性(半導体)から非磁性半導体へのスピン偏極キャリア注入とその検出を実証するのみならず、磁化による発光の偏光制御という新しい可能性を開いた。本研究成果をきっかけに、電気的スピン注入の検出とそれを発展させる研究が国内外で活発に行われるようになった。

我々はまた、p+(Ga,Mn)As/n+-GaAsトンネルダイオード構造を採用することにより、強磁性半導体からバンド間トンネルによるスピン偏極電子の注入にも初めて成功

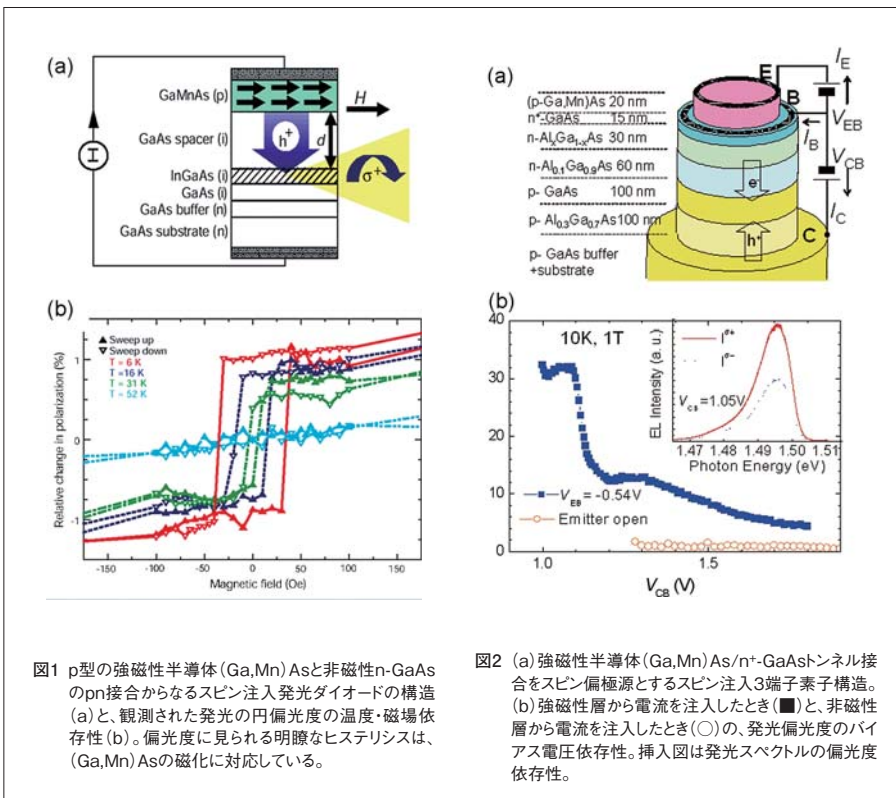


図1 p型の強磁性半導体(Ga,Mn)Asと非磁性n-GaAsのpn接合からなるスピン注入発光ダイオードの構造(a)と、観測された発光の円偏光度の温度・磁場依存性(b)。偏光度に見られる明瞭なヒステリシスは、(Ga,Mn)Asの磁化に対応している。

図2 (a)強磁性半導体(Ga,Mn)As/n+-GaAsトンネル接合をスピン偏極源とするスピン注入3端子素子構造。(b)強磁性層から電流を注入したとき(■)と、非磁性層から電流を注入したとき(○)の、発光偏光度のバイアス電圧依存性。挿入図は発光スペクトルの偏光度依存性。

図3 ポンプ・プローブ法により計測した、(100)および(110)面方位に形成したGaAs/AlGaAs量子井戸構造における室温での電子のスピンの緩和。本結果により、スピンの乱れを引き起こす実効磁場の方向が、量子井戸の面方位に依存することを実証した。

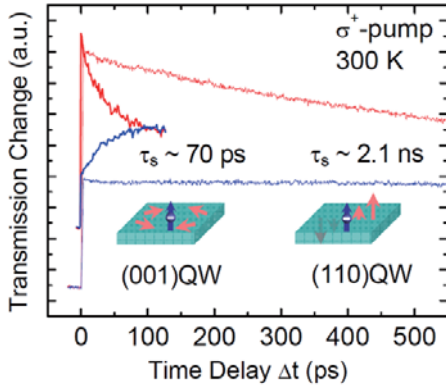
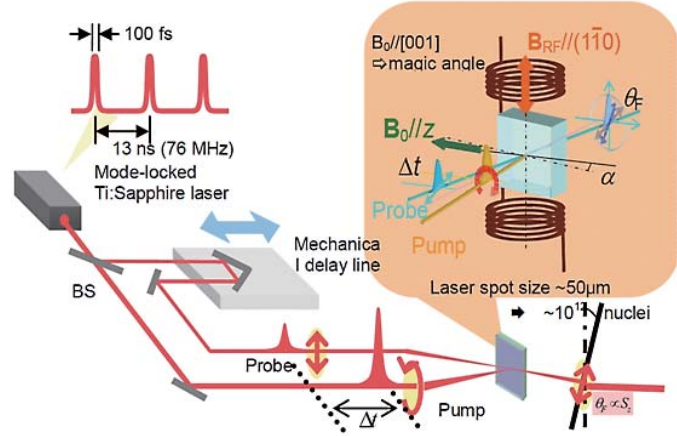


図4 半導体量子井戸構造における局所核スピン(核磁気共鳴)の検出に用いた時間分解ファラデー(カー)回転測定系。超短パルスレーザーで生成された光は、円偏光ポンプ光(スピン偏極電子を励起する)と直線偏光プローブ光(電子のスピン偏極により偏光面が回転する)に分けられる。外部から静磁場と振動磁界を印加すると、核スピンの磁気共鳴を起こしたところで電子に働く有効磁場が大きく変化する。その変化をプローブ光のファラデー(カー)回転角の変化より検出する。



した[2]。さらに、n+-GaAs層に電極を形成して強磁性/非磁性半導体トンネル接合と発光ダイオードに印加する電圧を独立に制御可能な3端子素子(図2a)を作製することにより、注入される電子のスピン偏極率のトンネルスペクトルスコピを可能にし、強磁性半導体(Ga,Mn)Asの電子状態を明らかにした(図2b)[3]。

2. 非磁性半導体における電子スピン・核スピンダイナミクスの研究

半導体中における電子・核スピン系は比較的長い量子力学的コヒーレンスを有しており、これを利用する固体量子情報処理の実現が期待されている。しかしながら、半導体量子構造では一般に電子スピンの緩和時間が短く、核スピンを効率よく操作・検出することが困難であった。我々は、半導体GaAs/AlGaAs量子井戸中の2次元電子のスピン緩和時間を如何に長くできるかについて検討し、主要なスピン緩和機構であるスピン・軌道相互作用(D'yakonov-Perel'機構)によるスピン緩和が抑制される(110)面方位を採用することにより、室温でナノ秒オーダーと通常用いられる(100)面の量子井戸より2桁以上長くなることを実験により明らかにした(図3)[4]。本研究の結果、極めて長いスピン緩和時間を有する電子系が半導体量子構造においても得られるようになったため、国外の研究グループも(110)面の

量子井戸構造を採用して電子スピンドイナミクスの研究をするようになり、これまで観測できなかった新しいスピンドイナミクスに関する物性が明らかにされていった。特に核スピンとの強い相互作用が可能なスピン偏極2次元電子系が得られたことにより[5]、時間分解ファラデー/カー回転法(図4)を発展させた磁気共鳴システムにより高感度に核スピン分極を調べるのみならず、その局所コヒーレンスを計測することが可能になった。

我々はこの(110)面半導体量子井戸構造を用いることにより、電界による電子-核スピン間相互作用の制御(図5)を実証する[6]とともに、磁気共鳴による核スピンコヒーレンス操作の光検出を初めて実証した[7]。

将来展望

半導体中のスピン自由度を活用する「半導体スピントロニクス」の基礎研究は着実に進んでいる。特にスピンの有する量子力学的なコヒーレンスを活用し、量子情報通信や量子コンピュータへの展開を

指向する「半導体量子スピントロニクス」の発展には、本研究成果で得られた「電氣的スピン注入」および「非磁性半導体量子構造におけるスピンコヒーレンス制御と検出」は不可欠な要素技術である。これらの研究をさらに進展させることにより、将来の情報処理・情報通信に役立つ新しい半導体スピントロニクスデバイスの実現が期待される。

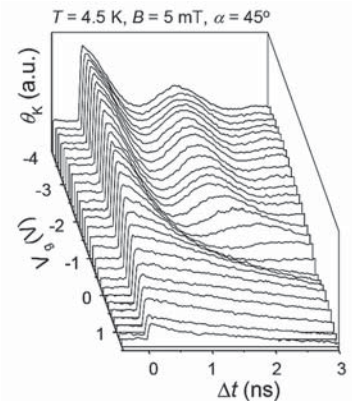


図5 電子・核スピン間超微細相互作用の電界制御の実験結果。縦軸(θ_K :カー回転角)は量子井戸と垂直方向の電子スピンの大きさに対応する。わずかな磁場を量子井戸面に印加することで、スピンの歳差運動に対応する振動が見られる。ゲート電圧(V_g)を変化させると、その振動周波数が変化している。これは、核スピン分極の大きさが変調されたことを示す。

References (参考文献)

- [1] Y. Ohno, D. K. Young, B. Beschoten, F. Matsukura, H. Ohno, and D. D. Awschalom, Nature 402, 790 (1999).
- [2] M. Kohda, Y. Ohno, K. Takamura, F. Matsukura and H. Ohno, Jpn. J. Appl. Phys. (Part 2) 40, L1274 (2001).
- [3] M. Kohda, T. Kita, Y. Ohno, F. Matsukura, and H. Ohno, Appl. Phys. Lett. 89, 012103 (2006).
- [4] Y. Ohno, R. Terauchi, T. Adachi, F. Matsukura, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. 83, 4196 (1999).
- [5] G. Salis, D.T. Fuchs, J.M. Nikkawa, D.D. Awschalom, Y. Ohno and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. 86, 2677 (2001).
- [6] H. Sanada, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. 94, 097601 (2005).
- [7] H. Sanada, Y. Kondo, S. Matsuzaka, K. Morita, C. Y. Hu, Y. Ohno, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. 96, 067602 (2006).