

ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクト中間評価報告書

研究総括：

大野 英男 【東北大学電気通信研究所 / 教授】

研究体制：

半導体スピン材料グループ（東北大学電気通信研究所）

スピン制御技術グループ（東北大学電気通信研究所）

スピン機能素子グループ（東北大学電気通信研究所）

評価委員：

井上 順一郎【名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 / 教授】

岡 泰夫 【東北大学多元物質科学研究所 / 教授】

新庄 輝也 【国際高等研究所 / 上級研究員、京都大学名誉教授】

新田 淳作 【東北大学大学院工学研究科知能デバイス専攻 / 教授】

（ は主査 ）

1. 総合評価（評価の概要）

評価： 秀（Excellent）

大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、戦略目標「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」のもと、半導体におけるスピン物性を顕著に発現させることを可能とする材料・構造の創出、それから材料・構造の物性の解明、さらに半導体中のスピンの制御技術を探索・開発することにより、「半導体スピントロニクス」という新科学技術領域を創り出すことを目的としている。このようなスピンを制御した新たな半導体科学技術への期待が高まってきた背景には、研究総括の大野教授らのIII-V族化合物半導体をベースとした強磁性半導体の創成に始まる一連の研究がある。すなわち大野総括らは(In,Mn)Asの合成（1989年）、(In,Mn)Asの磁性発現（1992年）、(Ga,Mn)Asの合成と磁性発現（1996年）、(Ga,Mn)AsからGaAsへのスピン注入（1999年）、(In,Mn)As強磁性の電界制御の成功（2000年）などの先駆的な研究により世界の注目を集め、世界的な研究の潮流をつくり出し、リードして来た。これらの業績が高く評価されていることは、III-V族強磁性半導体の創成以来、大野グループの発表論文が世界中で多く引用され続けていることが端的に証明してい

る。(2006年2月現在、引用件数上位12編の関連論文の総引用回数6033回)。「半導体スピントロニクス」という新領域の創出を目標とし、今もなお未踏分野の探索を先駆的に行っている本プロジェクトの研究の意義は十分に認められるものであり、ERATOが支援する対象として選択したことは極めて適切であったといえる。これまでの3年間のERATOの支援により、研究推進がさらに加速されるとともに、技術水準の高度化が達成されており、いくつかの新奇な現象の発見に至っている。個々の研究内容については次に紹介するが、その研究内容は非常に高く評価すべきであるというのが評価委員の一致した意見であり、総合評価としては「秀(Excellent)」を与えるべきである、という結論に達した。

2. 評価の詳細

大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、三つのテーマ(1)強磁性半導体の研究、(2)非磁性半導体の研究、(3)強磁性半導体材料開発の研究、に大別される。それらについての研究概要と評価結果を次に述べる。

(1) 強磁性半導体

ここでは大別して、強磁性の電界制御に関する研究と、強磁性半導体のスピン流による磁化制御の研究があり、どちらも世界に先駆けた先進的な研究成果が得られている。

大野グループのこれまでの研究により、III-V族強磁性半導体における強磁性はキャリア誘起であって、キャリア濃度の電氣的制御により強磁性相転移温度を可逆的に制御可能であることが明らかになっている。本プロジェクトでは、(In,Mn)As電界効果トランジスタ構造を用いて、キュリー温度より低い温度領域において電氣的な保磁力変調を見出し、それを用いて一定磁場下における電界アシスト磁化反転や電界消磁など、通常の金属磁性体では不可能な磁性の制御方法を世界に先駆けて初めて示すことに成功している(Science 2003)。また保磁力の電界変調に見られるスケーリング則も明らかにした。

強磁性半導体におけるスピン流と磁化の相互作用の実験的研究に関しては、表面をナノメートルスケールでエッチングすることによって得られる保磁力の変化と磁壁閉じ込め効果を利用して、スピン偏極した電流による電氣的磁壁スイッチングが強磁性半導体において可能であることを初めて示した(Nature 2004)。金属磁性体では容易にアクセスできない広範囲な電流-速度領域を実験的に定めることに成功し、初めてスピン移行で理解できる領域と、電流アシストの磁壁クリープで理解できる領域の二つの領域があることを明らかにした(Phys. Rev. Lett. 2006)。電流アシストの磁壁クリープでは、スケーリング則が成り立つことも初めて見出した。この一連の研究により、磁壁のスピン

流による移動機構を精密に検討することが可能となり、実験的に初めて閾値電流密度が磁気異方性定数で決定されていることが明らかにされた。ここで得られた最先端のデータは、強磁性半導体のみならず、金属磁性体を用いたスピン素子開発のためにも重要な情報であり、高く評価されるべきものであるといえる。

磁壁の物理を理解するには、その電気抵抗を測定することが重要である。本プロジェクトでは、外因性の抵抗要因がある中で、それよりも小さい抵抗を測定する構造・方法を考案し、(Ga,Mn)Asにおける磁壁抵抗を決めることに成功し、その抵抗が断熱的スピン輸送からのずれで説明できることを見出した(Phys. Rev. Lett. 2006)。このような精密な磁壁抵抗の決定と理論との比較は、その性質を理論的に記述できることが容易な強磁性半導体において初めて可能となったものである。

以上の磁壁に関する研究に加えて、(Ga,Mn)As/GaAs/(Ga,Mn)As 三層構造からなるピラー構造における電流誘起磁化スイッチングを初めて観測し、それが理論から期待されるよりも一桁低い電流密度で起こることも明らかにした(Phys. Rev. Lett. 2004)。

(2) 非磁性半導体

ここでは半導体量子井戸における電子スピン緩和機構の解明と制御、さらに光励起電子スピンを利用した動的核スピン分極による核スピンの制御についての研究を推進している。これまでに得られた特筆すべき成果としては、超微細相互作用による動的核スピン分極が電子濃度で大きく変化することを見出し、そのゲート電圧による制御を初めて実証したこと(Phys. Rev. Lett. 2005)、および、パルスNMRにおいてコヒーレントな核スピンダイナミクスを光検出を実証し、ポンプ・プローブ測定法で初めて局所領域の位相緩和時間 T_2 を測定したこと(Phys. Rev. Lett. 2006)があげられる。

さらに、*p*型の強磁性半導体(Ga,Mn)Asと非磁性半導体 GaAs/(Al,Ga)Asヘテロ構造により、スピン注入エサキダイオードと発光ダイオードを集積化した三端子素子を製作し、初めて注入電流のスピン偏極度をエネルギー分解して測定することに成功した。

(3) 材料開発

大野グループの理論的予測(T. Dietl, H. Ohno et al., Science **287**, 1019 (2000).)がきっかけとなり、世界的に広禁制帯幅の半導体を磁性体化する研究が盛んになっているものの、実験結果やその解釈が混沌としているのが材料開発研究の現状である。この状況を整理するため本プロジェクトでは、GaNをベースとした磁性半導体材料をモデル材料として取り上げ研究を進めている。六方晶型単結晶 Cr ドープ GaN では、磁化測定では室温においても強磁性を示すものの、磁気光学効果には強磁性的応答は観測されない。各測定の実験条件から、磁化測定で観測される強磁性成分は析出相によるものであり、母体に導入された Cr 間の相互作用は反強磁性的であろうことを示した。また希薄強磁性半導体(Ga,Mn)Asの強磁性発現機構の解明を目指す研究は着実に進行しており、高温

強磁性半導体を実現するための手がかりが得られることが期待される。他方ナローギャップの InSb 系磁性半導体材料の研究には、大きなスピン軌道相互作用等を利用した新しい機能デバイスの実証の可能性が含まれており、今後の進展に注目したい。

さらに材料に関連する研究として、磁気異方性を測定するツールとして磁気輸送特性による方法を確立した。強磁性半導体の異方性磁気抵抗効果は、結晶歪みとスピン軌道相互作用による価電子帯の異方性により生じることを明らかにし、電流と磁化のなす角に依存する素子抵抗から、磁気異方性磁場の大きさを決定できることを示した。さらに、低温強磁場において観測される強磁性半導体の負の磁気抵抗効果が弱局在に起因することを明らかにした(Physica E 2004)。ナノ領域の磁気異方性を評価する方法として有用であり、今後の研究の発展に資するものであると評価できる。

3. プロジェクトの運営状況と今後の見込み

大野総括らが発見した III-V 族強磁性半導体を巧みに利用し、その特徴を生かして従来の磁性体では不可能であった新奇な物理現象を発現させるなどの成果を中心に、ERATO の支援による研究は期待通りに進展していると評価できる。前項(1)(2)に対しては、評価委員が一致して高い評価を与えており、残りの2年間も現在の路線に沿った研究を推進し、さらに充実した成果を得ることが期待できる。一方(3)の材料開発については、幾つかの示唆されている興味深い成果をもとに、今後の方針・研究展開に大いに期待したい。

キュリー温度の高い磁性半導体を探索する研究が国内外で活発に行われるようになった現状は大野総括らの研究の波及効果ではあるが、本プロジェクトの使命は基礎研究面で最高レベルの研究を維持し、さらに発展させることにありと考えられる。すなわち、キュリー温度の上昇を目指す研究は重要ではあるが、そのために多くの物質系に手を広げるよりも、レベルの高い基礎研究に専念すべきであると信ずる。また応用面に関しては、将来的には本プロジェクトで蓄積されたものをデバイス応用に結びつけることが目標である以上、どのようなデバイスを具体的に目指すのか、そのプロトタイプイメージを明らかにしていくことが求められる。

本プロジェクトの研究体制は比較的コンパクトな人員構成であるが、効率的な研究推進が行われ、大野総括が優れた指導力と推進力を発揮している。メンバーにはポーランドの科学者を協力者として含み、国際協調を実践している。ポーランドとの協力には地理的な制約があるが、研究協力関係は保たれており、特に Tomasz Dietl ポーランド科学アカデミー教授(委託研究者)がしばしば来日することによって良好な連携が維持されているので、双方のグループが互いにメリットを得ていることは明らかである。国際的な評価に関しては、前述の論文引用数以外にも、プロジェクト発足以来3年あまりの

間にメンバーによる国際会議招待講演数が約 100 回に及ぶこと、大野総括が国際純粋応用物理学連合(IUPAP)磁性賞(2003 年)や、委託研究者の Dietl 教授とともに Agilent Europhysics Prize(2005 年)を受賞していることによって国際的に高く注目される研究プロジェクトとなっていることは明らかである。

ようするに大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、新分野を創出し、その確立を目指すものであり、世界的にも先導的な研究体制を構築していると認められている。その内容は独創的でかつ波及性が高く、ERATO の趣旨にまさに適合している。これまでの 3 年間の ERATO によるサポートは極めて有効であり、着実かつ順調に研究が推進された。ひきつづいてのサポートによって、今後 2 年間にも大きな成果が得られることを期待する。

以上