

(独)科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業

ERATO

大野半導体スピントロニクスプロジェクト
追跡評価用資料

研究総括：大野英男

2013年7月

目次

要旨	1
第1章 プロジェクトの概要	5
1.1 研究期間	5
1.2 プロジェクト発足時における科学技術や社会の背景	5
1.3 プロジェクトの目的	5
(1) 強磁性半導体	6
(2) 非磁性半導体	6
(3) 材料開発	6
1.4 研究組織	6
(1) 半導体スピン材料グループ	6
(2) スピン制御技術グループ	6
(3) スピン機能素子グループ	7
1.5 プロジェクト提案の独創性	7
1.6 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義	7
(1) 強磁性半導体	7
(2) 非磁性半導体	10
(3) 材料開発	12
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況	15
2.1 各研究テーマの現在の状況	15
2.1.1 調査方法	15
(1) 競争的研究資金の獲得状況	15
(2) 論文の発表状況	15
(3) 特許の出願・登録状況	15
(4) 招待講演	16
2.1.2 競争的研究資金の獲得状況	16
2.1.3 論文の発表状況	17
(1) プロジェクト期間中の発表論文	17
(2) プロジェクト終了後の発表論文	19
2.1.4 特許の出願・登録状況	20
(1) プロジェクトの特許出願	20
(2) プロジェクト終了後の特許出願	22
2.1.5 招待講演	24
2.1.6 各研究テーマの現在の状況のまとめ	24
(1) 強磁性半導体	24
(2) 非磁性半導体	25
(3) 材料開発	25
2.2 プロジェクトメンバーの活動状況	27

2.2.1	調査方法	27
(1)	受賞状況	27
(2)	プロジェクトメンバーの動静	27
2.2.2	受賞状況	27
2.2.3	プロジェクトメンバーの動静	28
2.2.4	プロジェクトメンバーの活動状況のまとめ	29
第3章	プロジェクト成果の波及と展望	30
3.1	科学技術への波及と展望	30
3.1.1	科学技術への波及事例	30
3.1.2	科学技術への波及のまとめ	31
3.1.3	今後の展望	31
3.2	社会経済への波及と展望	32
3.2.1	社会経済への波及事例	33
3.2.2	社会経済への波及のまとめ	33
3.2.3	今後の展望	33
	引用文献	34

要旨

大野半導体スピントロニクスプロジェクトは、「半導体スピントロニクス」という新分野の創成を目的とし、文部科学省の選定した戦略目標「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、2002年11月に発足した。具体的なプロジェクトのねらいは、半導体における磁性を含むスピン物性を顕著に発現させ従来の電荷の自由度に加えて磁性・スピンの自由度を用いた半導体スピントロニクスを開拓することであった。

このような目的を達成するために次のような研究チームが構成され、研究総括であった大野英男の本務先である東北大学電気通信研究所においてプロジェクトの研究が推進された。

(1) 半導体スピン材料グループ：グループリーダー1名、研究員4名、研究補助員2名

(2) スピン制御技術グループ：研究員4名、非常勤技術員1名

(3) スピン機能素子グループ：研究員4名、非常勤技術員1名

本プロジェクトの目的は、(1)強磁性半導体、(2)非磁性半導体、(3)材料開発の3つのテーマに集約される。

2002年11月～2008年3月のプロジェクト期間内に、上記のテーマにおいて次のような研究成果をあげた。

強磁性半導体は、本プロジェクトの中心テーマであり、試料として伝導キャリアのスピン偏極が輸送現象として確実に観測される強磁性半導体(Ga, Mn)Asを用い、強磁性メカニズムの解明や電流パルスによる磁壁スイッチング素子の実現、保磁力の電界制御と電界アシスト磁化反転実証などの新しい視点に基づく成果を創出した。

非磁性半導体は、スピンの量子的振る舞いが非磁性半導体の中では顕著に表われるため、これを制御することにより新しい情報通信技術や量子計算機の実現を目指そうとするテーマで、量子コンピューティングや量子暗号通信などへの応用につながる半導体を用いた量子もつれ光子対を生成することに成功した。

材料開発においては、室温以上の領域にキュリー温度をもつ材料を見出すには至らなかったものの、Mnなどの磁性を発生させる元素の濃度が高いナノサイズの領域の存在がキュリー温度や保磁力(coercivity)の増大に関係することを見出した。

プロジェクト終了後も研究総括の大野英男をはじめとして、プロジェクトメンバーの多くは同プロジェクトのテーマを継承した、あるいは同プロジェクトのテーマを発展させたテーマの研究を進めている。

大野英男は、プロジェクト終了後4件の競争的研究資金を獲得しており、その一つである内閣府の「最先端研究開発支援プログラム」の予算は総額34億円(2013年度まで)にのぼり、現在も本テーマによるプロジェクトを推進中である。プロジェクトメンバー2名も、競争的研究資金を獲得している。

プロジェクト期間中の発表論文85件(終了報告書記載)、プロジェクト終了後のプロジェクトメンバーの発表論文は142件であった。

プロジェクト期間中に発表された論文の累積被引用論文数推移を見ると、プロジェクト終了後もプロジェクト期間中とほとんど変わらず増加しており、平均被引用数も約41件(2003年～2012年)と多い。プロジェクトメンバーによる関連論文は、プロジェクト終了後もコンスタントに約

30 件／年と数多く発表されている。プロジェクト終了後に発表された論文の被引用数も増加傾向を維持し、調査日までの 5 年弱で約 1,700 件に達している。

本プロジェクトでは、プロジェクト期間中に 3 ファミリーの特許を出願しており、3 ファミリーとも国際出願を行っている。プロジェクト終了後出願された特許で、現在までに公開されている特許は 26 ファミリーである。プロジェクトの特許として最終報告書に記載された 3 ファミリーに比べて大幅に増加している。

プロジェクト期間内の強磁性半導体に関する研究では、(Ga, Mn)As が代表的な研究対象であったが、最近では、次世代メモリに向けた金属及び金属酸化物系の材料におけるスピン流による磁化反転の研究が多くなっている。非磁性半導体では、量子コンピューティングの実現に不可欠なもつれ光子を発生させる光源を始めとした研究が理論と応用の両面で進められている。プロジェクト期間中、材料開発については、室温以上の領域にキュリー点をもつ強磁性半導体の探索に重点があった(例えば Phys. Rev. B85, 174430(2012))。室温以上のキュリー点をもつ、磁性半導体の実現を目指す研究者は多く、大野英男グループ以外から同分野での報告がしばしば見られる。

大野英男は、2011 年にトムソン・ロイター引用栄誉賞を受賞している。同賞は、過去 20 年以上にわたる学術論文の被引用数に基づいて各分野の上位 0.1%にランクされる研究者の中から選ばれ、ノーベル賞の分野で特に注目すべき研究領域のリーダーの中から総被引用数とハイインパクト論文の数から候補者が決定される。本プロジェクトのメンバーおよび大野英男の上記受賞も含め、9 件の受賞があった。

プロジェクトのメンバーの中で、今回の調査において現況が判明したのは、14 名(内、職位不明 2 名)であった。職位が判明した 12 名のうち、6 名がキャリアアップしている(残り 5 名は同職位、2 名は不明)。

本プロジェクトにおける学術的な新発見は、電流による磁壁移動を観測したことである。この研究がきっかけとなって、金属磁性体でも電流による磁化反転が起こることが確認され、同領域の研究が大きな広がりを見せている。

また、キュリー温度が室温以上の強磁性半導体の探索が研究分野として活性化し、プロジェクトメンバー以外の研究グループからも、多くの論文等が発表されている。

非磁性半導体の研究については、将来の革新技術として期待されている量子情報処理技術への応用につながる重要な成果をプロジェクト期間内にあげた。

このようにプロジェクトの成果は科学技術に波及しているが、同成果は今後社会経済へも波及するポテンシャルをもっている。

情報通信機器が扱う情報量は増加を続け、このままではそのような大量のデータを扱う半導体集積回路の巨大な消費電力をまかなうことができなくなると予想されている。しかし、スピントロニクス応用の次世代不揮発性メモリが実現すれば、半導体集積回路のアーキテクチャは従来のものとはまったく異なったものになると予想され、大幅に情報通信機器の消費電力を削減できる。現在、日本の半導体産業は厳しい状況にあるが、大野英男はアーキテクチャの変革による根本的な低消費電力化を目指したスピントロニクス論理集積回路の基盤技術体系において、日本が世界の中心的地位を確立することを目標にプロジェクト活動及び大学での研究活動を進めている。

データセンターをはじめとする消費電力の問題は深刻で、新材料によるパワーデバイスや光集積回路による省エネなど様々な対策が検討され、大型プロジェクトが並行して進められている。次世代メモリについても、スピントロニクスを用いたもの以外に様々な方式が考案され、方式間での研究開発競争も見られる。

スピントロニクスを用いたデバイスは、これまで電流だけで動作を制御していた半導体において、従来の電荷の自由度に加えて磁性・スピンの自由度を活用する点で独創的な概念に基づいており、スピントルクによる磁化反転と電界効果による磁化スイッチングの方式について基礎研究が進展している。スピントロニクスを応用する次世代メモリでは、書き換え回数はほぼ無限であり、微細化するほど書き換えに要する電力を小さくできるという、磁気を用いるメリットを活用するとともに、電気によって駆動する点において従来の半導体との互換性が確保される。実際、STT-MRAM (spin transfer torque MRAM) と呼ばれるデバイスが、日本をはじめとして、米国、韓国などで開発され、現在サンプル供給のステージに至っている。

電流あるいは電圧による磁化の制御という、まったく新規な概念を用いるスピントロニクスデバイスは、社会全体が直面している情報電子機器の消費電力の増大という課題に対応するための様々な選択肢の一つと位置付けられ、実用化への道を歩んでいる。

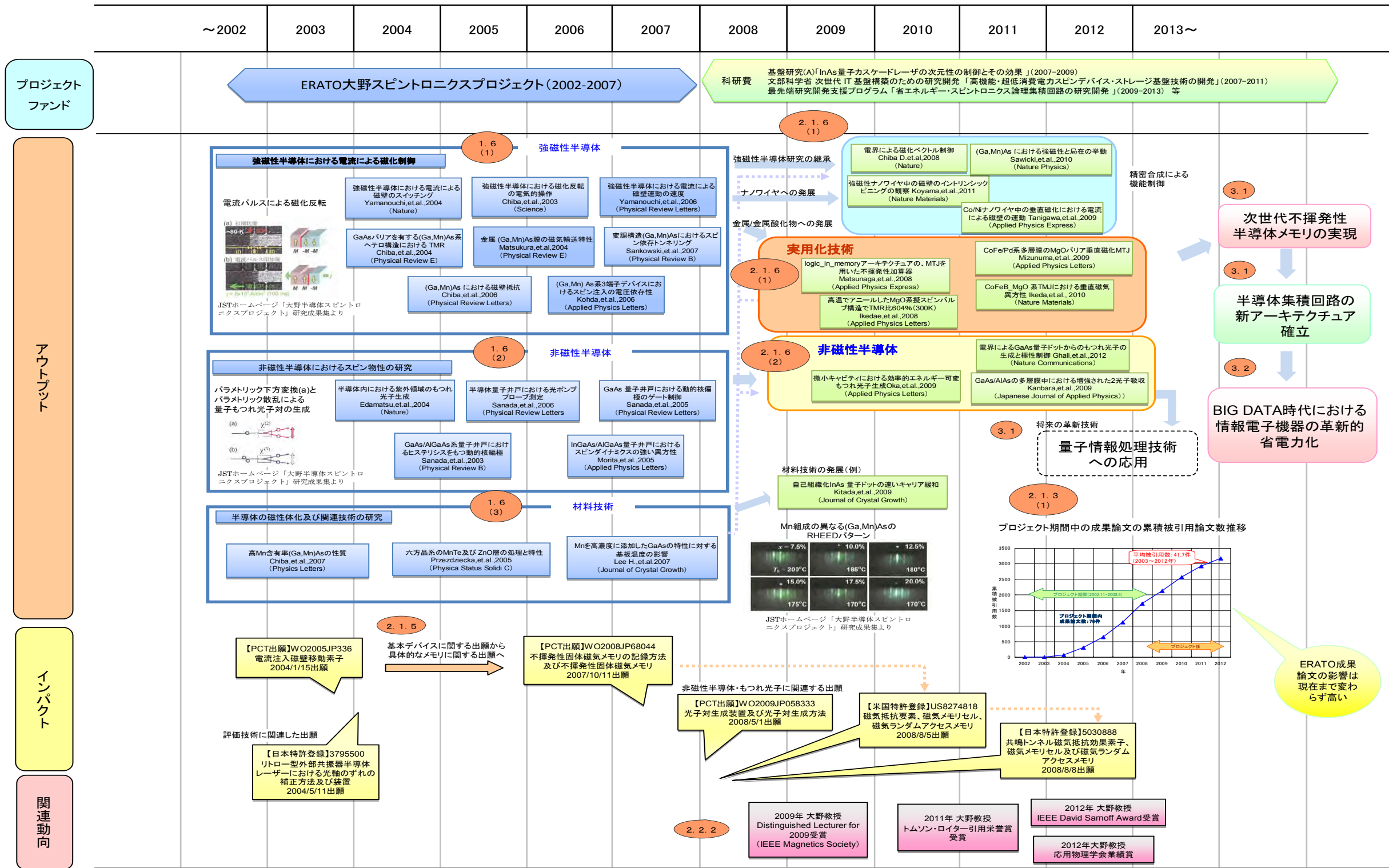


図 大野半導体スピントロニクスの展開状況(まとめ図)

第1章 プロジェクトの概要

本調査の対象である、ERATO「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」の概要を以下に示す。

1.1 研究期間

2002年11月～2008年3月

1.2 プロジェクト発足時における科学技術や社会の背景

これまで情報エレクトロニクス技術の驚異的な発展において、情報処理や情報通信を担う半導体集積回路デバイスは電子の電荷を利用し、ハードディスクに代表される情報蓄積は電子スピンを用いて情報を蓄積するというように、電子の電荷とスピンを別々に利用してきた。

これに対しプロジェクト発足時には、電荷とスピンの両方を利用する新しい技術分野、スピントロニクスが開拓されつつあった。特に半導体スピントロニクスは、半導体と磁性体の融合により、情報処理・記録・発光・受光を一つのデバイスで行うことを可能とすることに加え、スピン(電子スピン・核スピン)を量子的に操作し、かつそれを光子に写し取ることにより、量子情報処理、量子情報通信を実現するという可能性を秘めているという認識が生まれた。半導体デバイス関連企業においても、微細化による技術の進展に対する限界が意識され始め、磁性を用いた新規なメモリデバイスの開発が改めて注目されるようになっていた。

このような科学技術及び社会背景と、研究総括であった大野英男が、1996年に世界に先駆けて開発した強磁性半導体(Ga, Mn)Asの結晶成長技術、そしてそれに続く基盤的物性研究の成果が結びつき、大野半導体スピントロニクスというプロジェクトのスタートにつながった。

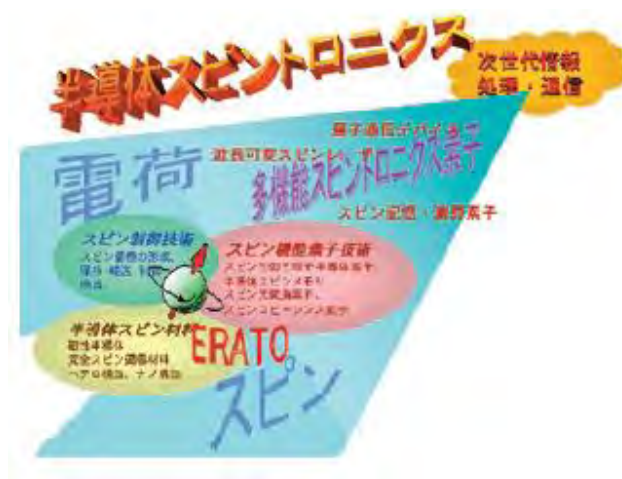


図 1-1 プロジェクトの構想

(出典：JST ホームページ ERATO「大野半導体スピントロニクスプロジェクト」)

1.3 プロジェクトの目的

本プロジェクトは、「半導体スピントロニクス」という新分野の創成を目的とし、文部科学省の選定した戦略目標「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

1 http://www.jst.go.jp/erato/research_area/completed/ohs_PJ.html

料・システムの創製」のもと、2002年11月に発足した。具体的なプロジェクトのねらいは、半導体における磁性を含むスピン物性を顕著に発現させ、従来の電荷の自由度に加えて磁性・スピンの自由度を用いた半導体スピントロニクスを開拓することであった。すなわち、既存の半導体テクノロジーの中で単に磁性を扱うのではなく、半導体におけるスピンの振る舞いなどへの深い考察をもとにして、スピン物性であるが故の特徴、強磁性半導体であるが故の特性を最大限にいかすことにより、新しいテクノロジーとエレクトロニクスの融合及び開拓を指向したものであった。

本研究プロジェクト開始のそもそもの発端は、大野英男らの高いキュリー温度を有するIII-V族強磁性半導体の発見にあったが、本プロジェクトの全体構想は、大野英男独自の強力なイニシアチブによる分野創造をその目標としたものであった。

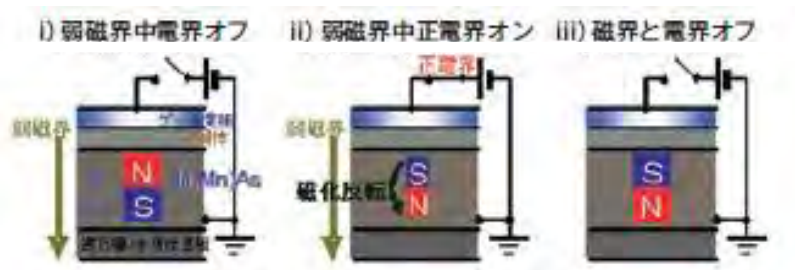


図 1-2 強磁性半導体電界効果トランジスタの電界制御による磁化反転過程
(出典：大野半導体スピントロニクスプロジェクト研究終了報告書)

本プロジェクトの目的は、次の3つのテーマに集約される。

(1) 強磁性半導体

電流による磁化制御と、電界による磁化回転制御の達成

(2) 非磁性半導体

非磁性半導体におけるスピン物性に関する研究

(3) 材料開発

ワイドバンドギャップ半導体及びナローギャップ半導体を含む半導体の磁性体化

1.4 研究組織

プロジェクトの研究実施の主体は、大野英男の本務先である東北大学電気通信研究所であり、プロジェクトの進行中での改編等を経て、(1)強磁性半導体、(2)非磁性半導体、(3)材料開発という3つの大きなテーマのもとで推進された。ポーランド科学アカデミー、中国科学院、ドイツ・マックスプランク研究所などの海外著名研究拠点と協力関係を持ち、また国内に目を転じると、理化学研究所や東京大学、北陸先端科学技術大学院大学などから研究者を採用するなど、国内外の異なる研究領域の知識を融合させた研究チームが編成された。研究チームの構成は次のとおりであった。

(1) 半導体スピン材料グループ

グループリーダー1名、研究員4名、研究補助員2名

(2) スピン制御技術グループ

研究員4名、非常勤技術員1名

(3) スピン機能素子グループ

研究員 4 名、非常勤技術員 1 名

1.5 プロジェクト提案の独創性

情報通信技術の発展においては、半導体集積回路に代表される各種半導体デバイスは電子の電荷を利用し、ハードディスクに代表される情報蓄積は電子スピンをを用いて情報を蓄積するというように、電子の電荷とスピンを別々に利用してきた。これに対し、電荷とスピンの両方を利用する新しい技術分野、スピントロニクス、特に半導体スピントロニクスは、半導体と磁性体の融合により、情報処理・記録・発光・受光を一つのデバイスで行うことを可能とする。また、スピン(電子スピン・核スピン)を量子的に操作し、かつそれを光子に写し取ることにより、量子情報処理、量子情報通信を実現するという可能性をも秘めている。本プロジェクトでは、これまで電流だけで動作を制御していた半導体において、磁性を含むスピン物性を顕著に発現させ、従来の電荷の自由度に加えて磁性・スピンの自由度を活用する半導体スピントロニクスを開拓することを目標としている点で、独創的なプロジェクト提案であった。

1.6 プロジェクト終了時点での研究成果やその意義

(1) 強磁性半導体

本研究テーマは、電流による磁化制御と電界による磁化回転制御というスピントロニクスの重要な研究課題の達成を目標としており、本プロジェクトの中心的役割を担う部分であった。

試料には、伝導キャリアのスピン偏極が輸送現象として確実に観測される強磁性半導体 (Ga, Mn)As を用い、強磁性メカニズムの解明や、保磁力の電界制御と電界アシスト磁化反転などの、新しい視点に基づく成果を創出した。ここに得られた成果は、今後の基礎的研究を行う上で大きな波及効果を与える可能性を持っている。本プロジェクトの成果が直ちに産業応用に結びついたとは言えないが、プロジェクトにおける成果から、磁性元素を含む半導体の成膜技術と微細加工技術、及び磁界ではなく電界による磁化反転、磁区制御技術が、2020 年までにその開発が期待されている、いわゆる「BeyondCMOS」世代のデバイスの動作実証に明らかに欠かせない要素となった。

この事実は国際半導体技術ロードマップ (International Technology Roadmap for Semiconductors ; ITRS) 2007 年度版にも記されており、我が国における半導体産業の基礎基盤技術に、国際競争力を与えることにつながる成果となった²⁾。

以下に、本研究テーマの主な具体的成果を述べる。

1) 強磁性半導体における電氣的磁壁スイッチングとその速度評価

面内に強磁性半導体 (Ga, Mn)As 膜厚の異なる 3 つの領域 (中央領域の膜厚が最も薄い) を有する構造を用いて、段差位置に初期配置した磁壁が電流により移動することを示した。

中央の膜厚の薄い領域に磁壁は閉じ込め可能であり、この領域のみの磁化を外部磁界ゼロで電流パルスによって反転させる電氣的磁壁スイッチング素子を実証した。(Ga, Mn)As の磁壁スイッチングに必要とされる電流密度は、強磁性金属細線における値よりも 2~3 桁低い 10^5A/cm^2 程度であつ

2 ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクト事後評価報告書

た¹⁾。さらに面内に(Ga, Mn)As 膜厚の異なる 2 つの領域を有する構造において、電流誘起磁壁移動速度は電流密度と温度の関数で $10^{-4} \sim 10 \text{ m/s}$ にわたって制御可能であり、その電流密度依存性には 2 つの領域があることを明らかにした²⁾。高電流密度領域 ($> \sim 3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$) においては、磁壁移動速度は電流密度にほぼ比例し、最高で 22 m/s の磁壁移動速度が得られた。理論との比較から、この領域の電流誘起磁壁移動機構はキャリア・スピンから局在磁気スピンへのスピンのトランスファによって説明できる。低電流密度領域においては、磁壁移動速度の電流密度依存性はスケーリング則に従い、スピン偏極した電流により磁壁のクリープが誘起されていた。同じ試料で測定した磁界誘起磁壁クリープもスケーリング則に従うが、そのスケーリング指数の値が異なること、更にその違いを理論的に説明できることから、電流誘起と磁界誘起のクリープ運動の物理的機構が本質的に異なることを明らかにした³⁾。

2) 面直磁気異方性を持つ(Ga, Mn)As の磁壁抵抗

(Ga, Mn)As において、磁壁の存在に起因する電気抵抗(磁壁抵抗)を調べた。理論的には磁性スピンとキャリア・スピンの角度のずれによる intrinsic な効果と電流磁気効果による extrinsic な効果が知られている。外部磁場により磁壁をストライプ状に用意できる素子を幾つか作製し、intrinsic な磁壁抵抗が磁壁面積に反比例することを利用してホール効果などから生じる extrinsic な磁壁抵抗と intrinsic な磁壁抵抗を区別した。その結果、intrinsic な磁壁抵抗は $\sim 0.5 \Omega \mu \text{ m}^2$ (55-60K) であることが分かった。また、up と down のスピンチャネルのミキシングによる抵抗増大メカニズムにより定量的に説明できることが分かった⁴⁾。

3) 強磁性半導体における電界アシスト磁化反転

III-V 族化合物半導体に磁性元素の Mn を %オーダーでドーピングした (Ga, Mn)As や (In, Mn)As はキャリア誘起強磁性体であり、その強磁性転移温度はキャリア濃度 p や Mn 組成の関数となることは理論的にも実験的にも知られていた。

また、2000 年に (In, Mn)As を用いて電界効果型トランジスタ (FET) 構造を作製し、電界で p を変調することで T_c が制御できるということを既に報告した。本研究では同様の FET 構造を用いて以下の主に 3 つの成果を得た。

① 電界印加により等温で可逆的に保磁力を制御できることを示した。

これはデバイス化後であっても電氣的に反転磁界を制御できるという応用上のメリットをもっている。

② 電界印加により保磁力を小さくすることにより、電界非印加時よりも小さな磁界で磁化反転が行えること(電界アシスト磁化反転)を示した。磁化反転の際の消費電力を下げるのが可能である。

③ 電界印加によりゼロ保磁力状態を作り外部磁界を必要としない等温消磁が可能であることを実証した^{5), 6)}。

4) (Ga, Mn)As の磁気特性の電界制御

上述のように、2000 年に正孔誘起強磁性体である (In, Mn)As を用いて電界により正孔濃度を増減し T_c を変調することに成功し、さらに 2003 年には、(In, Mn)As の保磁力 H_c の大きさを制御するこ

とで電界アシスト磁化反転を実証した。しかし、一般的に(In, Mn)As より高い T_C を持ち広く研究がなされている(Ga, Mn)As においては、明確な T_C の電界制御はなされていなかった。本研究では(Ga, Mn)As をチャネル層にもつ電界効果型素子構造を作製し、電界により世界で初めて(Ga, Mn)As の T_C を明確に制御することに成功した⁷⁾。

5) 磁性半導体トンネル接合におけるスピン注入磁化反転

III-V 族化合物半導体に磁性元素の Mn を%オーダーでドーピングした(Ga, Mn)As は一般的な強磁性金属に比べてスピン偏極率が高いことが第一原理計算や平均場近似理論により理論的に指摘されていた。したがって(Ga, Mn)As ベースの磁気トンネル接合(MTJ)において、高いトンネル磁気抵抗(TMR)比が期待できる。それに加え、単位体積あたりの磁気モーメントが極めて小さいので、スピントルクによる磁化反転も強磁性金属より2-3桁小さい電流密度で可能になることが理論的に予測される。本研究では(Ga, Mn)As/GaAs/(Ga, Mn)As MTJにおいて290%のTMR比を得ることに成功した。これはスピン偏極率に換算すると77%に相当する。また、サブミクロンサイズに加工された同様の素子では $1-2 \times 10^5 \text{A/cm}^2$ という極めて小さな電流密度でのスピン注入磁化反転を観測した⁸⁾。

6) 磁性半導体における磁化の操作

(Ga, Mn)As におけるスピン再配向転移を観察し、立方磁気異方性と一軸磁気異方性の、温度、ホール濃度、歪みに対する依存性を明らかにした^{9),10)}。また、(Ga, Mn)As の大面積電界効果デバイスのプロセスを開発し、SQUID(Superconducting quantum interference device)磁束計測法により、ゲート電界が T_C の値を2倍変化させることを示した¹¹⁾。

7) 磁性半導体理論

p 型 II-VI DMS の強磁性の相転移に対する熱的不規則性及び凍結された不規則性の影響を評価するハイブリッドモンテカルロ法のプログラムコードを改良し、次の5項目について p-d Zener モデルで評価した¹²⁾。

- (i) 磁気異方性と SRT のエネルギーの歪、温度、正孔濃度に対する依存性
- (ii) 正孔の磁気モーメントと有効ランダウ因子
- (iii) 光学伝導度
- (iv) magnetic stiffness とスピン波スペクトル
- (v) 異常ホール効果

また、層構造の強磁性 DSM の強結合 Landauer-Buttiker モデルを精緻化し、真性磁壁抵抗とともに磁気トンネル接合におけるエサキ-ツェナーダイオードのスピン流偏極の大きさと TMR を評価した。さらにデバイス特性を、結晶の異方性、温度、バイアス、バンドオフセットの関数として調べることにより、デバイスの最適化を行った。

さらに、正孔と窒化物、酸化物中の磁気不純物との強い p-d 結合に対する、非摂動一般合金理論により、結合エネルギーの増大、バンドの交換分裂の減少、不純物濃度の増加に伴うエネルギーギャップの増大を説明した¹³⁾。また、GaAs:Mn において、Mn により捕らえられた光電子と正孔の結合を特徴づける交換エネルギーは、s-d 交換エネルギーに打ち勝つことを示した¹⁴⁾。

(2) 非磁性半導体

スピンの量子的振る舞いが、非磁性半導体の中では顕著に表われる性質を利用して、その制御により新しい情報通信技術や量子計算機の実現を目指し、電子スピンと核スピンの相互作用について基礎研究を進めた。研究には、「時間分解ファラデー回転測定法」が強力なツールになっており、研究手法の確立につながった。また、量子コンピューティングや量子暗号通信などへの応用につながる半導体を用いた量子もつれ光子対を生成することに成功した。

1) 半導体量子井戸における動的核スピン分極の双安定性とその制御

本研究では異なる異方性 g 因子をもつ n 型 GaAs/AlGaAs (110) 量子井戸試料を用意し、光励起動的核スピン分極の傾斜磁界依存性を時間分解ファラデー回転測定により系統的に調べた。それぞれの試料において、電子スピンの歳差運動周波数の外部磁界依存性に電子スピン-核スピン系の双安定状態を反映したヒステリシスを観測し、異なる異方性 g 因子ではヒステリシスの形状及び現れ方が大きく異なることを示した。

異方性 g 因子を考慮した自己無撞着計算により実験結果を定量的に解析し、電子スピン-核スピン系における双安定状態を再現した。動的核スピン分極に見られるヒステリシスは、低磁界領域では電子スピンの感じる有効磁界 Ω_{tot} のうち外部磁界の寄与する項に依存し、その向きは g 因子の符号によって大きく変わることが実験的に確認された。本研究により半導体量子井戸構造における動的核スピン分極は外部磁界と異方性 g 因子の組み合わせにより制御できることが示された¹⁵⁾。

2) 半導体量子井戸における超微細相互作用の電界制御

半導体量子構造におけるスピン偏極電子と核スピンとの間の相互作用を明らかにし、これを制御することを目的に、ショットキーゲートを有する n 型 GaAs/AlGaAs (110) 量子井戸を作製し、円偏光光励起により生成された電子スピンによる動的核スピン分極と、核スピン緩和時間 T_1 の電子密度依存性を調べた。電子スピんに作用する核磁場の大きさを調べるため、時間分解カー回転測定を行い、励起された電子スピンの歳差運動周波数から実効的な磁界と核スピン分極の大きさを見積もった。ゲートに印加する電圧を変えながら、外部印加磁界によるスピン分裂の影響が無視できるほど小さい磁界領域 ($\sim 5\text{mT}$) において動的核スピン分極を調べたところ、電子密度を減少させ、金属領域から絶縁体領域に遷移したときに動的核スピン分極が強められることを明らかにした。さらに、 T_1 の電子密度依存性を調べたところ、動的核スピン分極が強められる絶縁体領域で、 T_1 が一桁以上短くなることを明らかにした¹⁶⁾。

3) 半導体量子井戸における核スピンのコヒーレントダイナミクスの光検出

半導体量子井戸構造における核スピンコヒーレンスの光検出を実証した。円偏光の光パルスにより励起した電子スピンの歳差運動を時間分解カー回転測定法により観測し、電子の感じる局所核磁場を検出した。パルス RF 磁界照射により歳差運動する核スピン分極のラビ振動を、カー回転角の信号変化として読み出せることを実験的に示した。また、スピンエコー法により局所的な核スピンの位相緩和時間と不均一広がりによる実効的な位相緩和時間を得た¹⁷⁾。

4) InGaAs 量子井戸のスピンの緩和異方性

大きなスピン緩和の異方性が期待される井戸幅の狭い (5 nm) InGaAs/AlGaAs 歪量子井戸を (110) 面と (100) 面 GaAs 基板上に分子線エピタキシャル法により作製し、そのスピン緩和の異方性ダイナミクスを時間分解ファラデー回転法によって調べた。ゼロ磁場での測定より、高温 (150K) での面直方向のスピン緩和時間は (110) 量子井戸の方が (100) 量子井戸に比べて約 25 倍長いものに対して、低温 (5K) での面直方向のスピン緩和時間は (110) 量子井戸の方が (100) 量子井戸に比べて約 10 倍長いことが分かった。この結果は、低温においてもスピン軌道相互作用に起因する電子スピン緩和 (D'yakonov-Perel: DP) 機構が作用していることを示唆する。さらに面内方向に磁場を印加した場合、異方性の強い (110) 量子井戸では、150K と 5K のどちらの温度でもスピン緩和時間が短くなることが分かった。特に、面直方向と面内方向の電子スピン緩和時間の差が大きい高温では、電子スピン分極の面内成分が急速に減衰し、歳差運動によるスピンの回転が抑制されることを明らかにした。また、定量的な解析から、150K でのスピン緩和時間の異方性は 60 倍に達し、さらに 5K でも数倍あることを示した^{18), 19)}。

5) 半導体量子構造におけるスピン・光起電力

分子線エピタキシャル法により (001) 及び (113) 面に作製した GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造で、円偏光で励起した際に偏光に依存した光電流が観測された。その光入射角依存性から、光電流はスピン状態を反映していることを明らかにした。

6) GaN における電子・正孔スピンのコヒーレンス

Si ドープ n-GaN 及び Mg ドープ p-GaN における電子・正孔のコヒーレントスピンドイナミクスを磁場中における時間分解カー回転測定により調べた。その結果、n-GaN における電子のスピンコヒーレンス時間は 2ns、g 因子は $g_{\perp} = 1.9492 \pm 0.0008$ 、 $g_{\parallel} = 1.9508 \pm 0.0008$ であることがわかった。p-GaN においても、磁場中での TRKR の振動が観測された。磁場の角度依存性より求められた g 因子の異方性から、B バンドの正孔のスピン歳差運動を観測していることがわかった。その緩和時間は 120ps で、 $g_{\perp} = 2.17 \pm 0.03$ 、 $g_{\parallel} = 2.27 \pm 0.03$ であった。また、p-GaN では、異なる歳差運動周波数で振動する電子スピンと正孔スピンの間に起因するビートが TRKR 信号に観測された²⁰⁾。

7) MOS ゲート構造を持つ n 型縦型量子ドットにおけるスピン依存伝導

原子層堆積 (ALD) 法を適用することにより極微細 3 次元 MOS 構造からなる縦型量子ドット構造を作製し、MOS 構造で「人工原子」とその電子状態制御を実現した。さらに、ALD 法と中空配線構造を適用することにより、高 In 組成の狭ギャップ半導体 InGaAs 共鳴トンネルダイオードをベースとする MOS ゲート縦型量子ドット構造の作製に成功し、「人工原子」の電子状態形成を実証するとともに、有効 g 値の大きさを磁気輸送特性より評価した^{21), 22)}。

8) スピンエサキダイオードにおけるスピン偏極電子のバンド間トンネル注入

p 型の強磁性半導体 (Ga, Mn) As と n⁺-GaAs からなるスピンエサキダイオードにおいて、バンド間トンネルにより注入される電子のスピン偏極率を最大にするため、素子構造の最適化を行った。注入された電子のスピン偏極率は、スピンエサキダイオードの下に位置する発光ダイオード (LED) か

らの発光の偏光度(P_{EL})測定より評価した。(Ga, Mn)As に隣接する n^+ -GaAs のドーピング濃度及び膜厚の異なる試料について P_{EL} を調べた結果、 n^+ -GaAs が完全に空乏している試料で高い P_{EL} (最大 22.3%) を得たのに対し、中性領域がある試料では最大で 8% 程度であったことから、(Ga, Mn)As/ n^+ -GaAs 界面がスピン偏極率に強く影響することを明らかにした。また、スピンエサキダイオードと LED 間の n^+ -GaAs/ n - $Al_xGa_{1-x}As$ 層に電極を設けることにより、独立にバイアス電圧を印加可能な 3 端子素子を作製し、 P_{EL} のバイアス電圧依存性を系統的に調べた結果、(Ga, Mn)As のフェルミエネルギー近傍の価電子がバリスティックに LED の活性層に注入されるバイアス条件において最高で 32.4% の P_{EL} を観測した。また、ハンレ測定の結果から、実際に注入されている電子のスピン偏極率は 85% 以上と非常に高い値であることを明らかにした^{23), 24), 25)}。

9) 半導体におけるスピン・角運動量を利用した量子もつれ光子発生及び光子-スピン量子メディア変換素子

半導体結晶中の励起子分子における 2 励起子間のスピン・角運動量のもつれ状態を利用し、その 2 光子共鳴励起下におけるハイパーパラメトリック散乱によって偏光に関する量子もつれ光子対を発生する技術を開発した。この方法を CuCl (塩化第一銅) 単結晶に適用することにより、半導体を用いて量子もつれ光子対を生成することに成功した²⁶⁾。光の偏光状態の重ね合わせ状態を、半導体量子井戸の電子スピンの偏極状態の重ね合わせとして転写することに成功し、量子状態転写の必要条件を実験的に検証した²⁷⁾。

10) 非磁性半導体におけるスピン操作

強磁性金属の微小磁石を含むナノ構造ハイブリッド半導体のマルチレベル電子ビームリソグラフィとプロセスを開発した。GaAs/AlGaAs のナノ構造におけるシュテルン-ゲルラッハ効果と、GaAs/AlGaAs と PbTe/PbEuTe のポイントコンタクトにおけるゼーマン効果によって、スピンを選択 (spin filtering) できることを示した²⁸⁾。

(3) 材料開発

本テーマの最も大きな目的は高いキュリー温度をもつ材料の探索であった。Mn などの磁性を発生させる元素の濃度が高いナノサイズの領域の存在が、キュリー温度や保磁力 (coercivity) の増大に関係することを見出したが、室温以上の領域にキュリー温度をもつ材料を見出すには至らなかった。しかし、新材料の探索だけでなく、磁気抵抗効果などの評価方法の検討においても成果をあげ、今後の半導体デバイスへの応用の基礎を固めに寄与した。

1) 高い Mn 組成をもつ (Ga, Mn)As の作製と評価

強磁性半導体 (Ga, Mn)As の強磁性転移温度は、一般的には正孔濃度 p と Mn 組成 x が大きくなるほど高くなることが p - d Zener モデルにより示唆されている。しかし、高い Mn 組成 ($x > 0.1$) をもつ (Ga, Mn)As の MBE 成長は MnAs などの析出が起こりやすく困難であった。本研究では成長中の基板温度を下げ、また析出が起こる前に成長をストップすることでより高濃度に (最大で $x=0.2$) Mn を導入することに成功した。成長した試料は、磁化測定、ホール測定、MCD 測定、チャネリング PIXE (Particle induced x-ray emission)-RBS (Rutherford back scattering) 測定により様々な角度からその磁性

や結晶物性を評価した。得られた最高の T_c は 165K であり、p-d Zener モデルの予想を大幅に下回る結果となったが、 T_c は依然として x や p が大きくなるほど上昇傾向にあることが分かった^{7), 29)}。

2) 高温成長による Mn ドープ GaAs の作成と評価

高温分子線エピタキシャル法による Mn ドープ GaAs の作成とその評価を行った。As/Ga の flux 比を制御することにより、400 °C 以上の高温で、パーセントオーダー以下の Mn 濃度の GaAs を成長できることを示した。Mn 濃度 0.3% の GaAs がキュリー温度 10K の強磁性を示し、量子井戸構造はキュリー温度を上昇させることがわかった³⁰⁾。

3) (Ga, Mn)As の異方性磁気抵抗効果及び弱局在磁気抵抗効果

GaAs (001) 基板上に成長した圧縮歪みと引っ張り歪みを持つ 2 枚の (Ga, Mn)As の異方性磁気抵抗効果について調べた。圧縮歪みを持つ (Ga, Mn)As は面内に、引っ張り歪みを持つ (Ga, Mn)As は面直方向に磁化容易軸を持つ。これらの試料からホール・バーを作製し、外部磁界により電流と磁化の相対角を変えることで、異方性磁気抵抗効果を測定した。0.2T 以上の磁界における抵抗はすべての素子に対して電流と磁化方向が平行の場合に最小値をとることが分かった。電流と垂直に磁界を印加した場合は、圧縮歪みを持つ素子においては磁界が面に垂直の際に、引っ張り歪みを持つ素子においては磁界方向が面内にある時により高い抵抗を示した。この結果は、p-d Zener モデルから計算される価電子帯構造を持つ (Ga, Mn)As に対して期待される結果と良く一致した。磁気抵抗効果の詳細は電流の方向にも依存し、これは面内 [100] と [-110] 方向に歪みの違いなどに起因した価電子帯の非対称性があることを示唆している。低温高磁界で観測される負の磁気抵抗効果は弱局在効果で説明できることも示し、この結果を基にスピン散乱時間の下限値を決定した³¹⁾。

4) 磁気輸送特性による (Ga, Mn)As の磁気異方性の評価

GaAs (001) 基板上に成長した圧縮歪みを持つ (Ga, Mn)As の面内磁気異方性定数とその温度依存性を磁気輸送測定から評価した。試料を磁界中で回転する際に生じるシート抵抗と横抵抗(プレーナホール効果)の変化を一斉磁化回転モデルにより解析することで、面内一軸磁気異方性定数と立方異方性定数の大きさを決定した。これらの値と同じ試料に対して行なった強磁性共鳴から得られた異方性磁気定数の値を比較することで、磁気輸送測定による磁気異方性定数の評価の正当性が確認できた³²⁾。

5) 高いキュリー温度をもつ強磁性半導体の探索

Zn_3N_2 のスパッタリングと酸化及び MBE により成長された N、As、又は Sb ドープの (Zn, Mn)Te の酸化により得られた、p-type ZnO, (Zn, Mn)O, (Zn, Cr)O の開発により、 T_c (キュリー温度) の高い DMS (Diluted magnetic semiconductor) を探索した。Cr は正孔濃度を増加させるが、Mn は減少させることを示した³³⁾。

(Zn, O)Mn、(Zn, Co)O、(Zn, Cr)O、(Zn, Cr)Se、(Zn, Mn)Te、(Ga, Mn)N、(Ga, Fe)N、and (Ga, Mn) に対する先端の高分解能 SQUID 磁束計測から、次の 2 つの結果が導かれた。

- DMS の高い T_c と保持力 (coercivity) の増加は、強磁性のもととなる元素 (Mn など) の濃度の大きなナノスケール領域の存在に端を発している。

・ホールの介在による強磁性における (Ga, Mn)As の T_c は、175K 以下で飽和し、その他の II-VI 及び III-V DMS ではさらに低くなる³⁴⁾。

また、(Zn, Mn)O と少量の Mn イオンを含む $MnCd_{1-x}MnxTe$ の励起子スピン分解と光学的スピン注入について磁気光学的な調査を行った。

6) DMS の磁気抵抗効果におけるスピン効果

n -(Zn, Mn)O、 n -(Zn, Co)O、 p -(Ga, Mn)As と、modulation ドープした n -(Cd, Mn)Te/(Cd, Mg)Te のヘテロ構造について、低温における磁氣的、磁気輸送的な調査を行った。その結果、次のことを明らかにした。(Ga, Mn)As と n -ZnO の高電界磁気抵抗効果と低電界におけるプラスの磁気抵抗効果は、弱い局在と非局在によって定量的に説明できる。 n -(Cd, Mn)Te の量子井戸における磁気抵抗効果の解析は、(Ga, Mn)As、 n -(Zn, Mn)O、及び n -(Zn, Co)O において観察される無秩序状態 DMS の温度依存性のある局在と臨界散乱を裏付ける強磁性クラスタリングを示唆している。(Ga, Mn)As の磁気異方性に対する歪みの影響は、 p - d Zener モデルの範囲内において、理論的予測と一致する³⁵⁾。

7) CrSb/GaAs 多層膜構造の作製と評価

キャリアのスピン偏極率が 100% と理論的に予測されている閃亜鉛鉱型 CrSb と GaAs の多層膜構造の作製に成功した。分子線エピタキシャル法により、CrSb1 原子層と GaAs5nm の周期多層膜構造 (1-10 周期) を作製し、成長中の高速電子線回折像による試料の表面観察から、閃亜鉛鉱型を保持した単結晶が得られていることを確認した。また、高分解透過電子顕微鏡による試料断面の観測からも、転位のない閃亜鉛鉱型構造単結晶が得られていることを確認できた。これらの多層膜構造の磁化測定を行い、室温において強磁性的振る舞いを示すことが分かった³⁶⁾。

第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

プロジェクト研究成果の進展やプロジェクトに関連した研究者の現況を明らかにするため、プロジェクトメンバーの獲得した競争的研究資金、論文発表状況、特許出願・登録状況、受賞、動静、招待講演などを調査した。

なお、論文及び特許については、プロジェクト期間中の発表論文、出願特許についても、プロジェクト終了後の状況(論文の被引用状況、出願特許の審査・登録状況等)を調査した。また、競争的研究資金の獲得状況は、プロジェクト期間中に開始されて、プロジェクト終了後も存続した競争的研究資金も対象とした。

2.1 各研究テーマの現在の状況

2.1.1 調査方法

プロジェクトメンバー全員を対象として、プロジェクトの研究内容に関連した競争的研究資金の獲得状況、論文の発表状況、特許の出願・登録状況、招待講演を調査し、獲得した競争的研究資金の評価報告書(中間、事後)、終了報告書等や関連する総説、論文等と併せて、各研究テーマの現在の状況をまとめる。下記(1)～(4)に調査方法の概要を記す。

(1) 競争的研究資金の獲得状況

プロジェクトメンバー全員を対象とし、調査対象者(プロジェクトメンバー)が研究の代表者となっていて、研究内容が ERATO プロジェクトの研究内容に関連しており、かつ研究費総額 1 千万円/件以上の研究資金に限定した。

競争的研究資金の獲得状況については、下記の Web サイトの調査を行った。

- ・調査対象者の所属する研究室や本人の Web サイトの調査
- ・競争的研究資金の担当機関の Web サイト内、データベース検索
担当機関としては、内閣府の競争的資金制度一覧³等を参考とした。
- ・補助的に Google 等の検索サイトの検索

(2) 論文の発表状況

プロジェクト期間内の論文は、プロジェクトの終了報告書に成果論文として記載されている論文とした。プロジェクト終了後の関連論文は、プロジェクト終了後にプロジェクトメンバー(終了報告書記載)が発表した(終了報告書に in press 等として記載されているものは除く)、プロジェクトの研究に関連した原著論文とした。

- ・使用データベース
Scopus(エルゼビア社)

(3) 特許の出願・登録状況

プロジェクト期間内の特許は、プロジェクトの終了報告書の成果リスト記載の特許とした。プロジェクト終了後の関連特許は、プロジェクト終了後にプロジェクトメンバー(終了報告書記載)が

3 <http://www8.cao.go.jp/cstp/compefund/12ichiran.pdf>

発明者となっている、プロジェクトの研究に関連した特許とした。

- ・使用データベース

日本特許：CKSWeb(中央光学出版社)、海外特許：Thomson Innovation(トムソン・ロイター社)

(4) 招待講演

プロジェクトメンバーのプロジェクト終了後の招待講演実績を、調査対象者の所属する研究室や本人の Web サイトを調査し、講演タイトルから本調査対象の ERATO プロジェクトと関連の薄いものや、プロジェクトの終了報告書記載のものを除外し、招待講演実績とした。

2.1.2 競争的研究資金の獲得状況

プロジェクトメンバーがプロジェクト終了後に獲得した競争的研究資金を表 2-1 に示した。

研究総括の大野英男が、科学研究費補助金(以下「科研費」)基盤研究(A)「InAs 量子カスケードレーザーの次元性の制御とその効果」を獲得し、ERATO のプロジェクトを引き継いで量子カスケードレーザー(QCL)に対する磁場の効果を調べる研究を行い、InAs の QCL の閾値電流と磁場の関係において新規な現象を見出した。また、ZnO 量子井戸において初めてサブバンド遷移を観測するという成果を上げた。また、大野英男は、2009 年に総額 34 億円(2013 年度まで)にのぼる予算を内閣府の「最先端研究開発支援プログラム」において獲得し、現在も本テーマによるプロジェクトを推進中である。

グループリーダーであった松倉文礼は、科研費基盤研究(B)「強磁性半導体中の電流誘起磁壁移動」を獲得し、ERATO のプロジェクトをほぼそのまま引き継いで、MBE 法を用いた(Ga, Mn)As における磁界誘起磁壁移動について調査した。その結果、試料の平坦性がスケーリング指数を支配することを示すことができた。その後引き続いて松倉文礼は、科研費基盤研究(B)「p 型非磁性半導体におけるスピン流の生成と検出」を獲得し、前回の強磁性半導体ではなく非磁性半導体を材料として、スピン流の研究を行って成果をあげた。

千葉大地は、科研費若手研究(A)「電気的な磁化操作に関する研究」を獲得し、強磁性半導体を用いて電氣的に磁化を操作する研究を行った。これは ERATO のプロジェクトをそのまま引き継いだテーマである。また、千葉大地は、さきがけ研究領域「ナノシステムと機能創発」の研究課題「電界による磁化スイッチングの実現とナノスケールの磁気メモリの書き込み手法への応用」においても予算を獲得し、ERATO プロジェクトのテーマを超高密度磁気メモリデバイスの開発に生かす方向の研究に取り組んでいる。

大野英男は、2007 年に文部科学省「次世代 IT 基盤構築のための研究開発」の研究費を獲得し、ERATO プロジェクトのテーマを、次世代の高機能・超低消費電力コンピューティングデバイスに生かす研究に取り組んだが、その後同プロジェクトの代表者は村岡裕明(ERATO プロジェクトのメンバーには含まれていない)に引き継がれた。

表 2-1 プロジェクトの競争的研究資金獲得状況

競争的研究資金	名称	予算額 (億円)	研究 代表者	研究年度													
				2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
ERATO	大野半導体スピントロニクスプロジェクト	総額:	大野英男														
1	科研費 基盤研究(A)	InAs 量子カスケードレーザの次元性の制御とその効果	総額: 0.3	大野英男													
2	科研費 基盤研究(B)	強磁性半導体中の電流誘起磁壁移動	総額: 0.2	松倉文礼													
3	科研費 基盤研究(B)	p型非磁性半導体におけるスピン流の生成と検出	総額: 0.2(2011,2012年度)	松倉文礼													
4	科研費 若手研究(A)	電氣的な磁化操作に関する研究	総額: 0.3	千葉 大地													
5	最先端研究開発支援プログラム	省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発	総額: 32+2(加速・強化配分)	大野英男													
6	さきがけ 研究領域: ナノシステムと機能創発の研究課題	電界による磁化スイッチングの実現とナノスケールの磁気メモリの書き込み手法への応用	総額: ~0.4	千葉大地													
7	文部科学省「次世代 IT 基盤構築のための研究開発」	高機能・超低消費電力スピントロニクス・ストレージ基盤技術の開発	総額: 17.3	大野英男⇒ 村岡裕明													

研究概要

1	中赤外 InAs 量子カスケードレーザの発振特性の磁場依存性を調査した。また、磁場の効果をテラヘルツ帯において検討するために、GaAs テラヘルツ量子カスケードレーザを開発した。さらに、テラヘルツ帯において温度特性などの面で高性能化が期待できる ZnO 量子井戸構造に関して、ZnO 量子井戸構造サブバンド間遷移を初めて観測した。
2	磁気光学カー効果を用いて磁界誘起磁壁移動について調査し、初期磁化配置として面直下向きに磁化を揃えた後、面直上向きに大きさを変えながら外部磁場を印加することで磁壁移動速度の外部磁場依存性を調べた。試料の平坦性がスケーリング指数を支配することを示すことができた。
3	未公開
4	外部磁場を用いずに電界のみで磁化をスイッチする条件をシミュレーションによって明らかにし、電界により変化させるべき磁気異方性の大きさを具体的に示した。また、強磁性ナノドット配列を作成することに成功し、均一な磁気特性を持つ薄膜から、電界によって磁気特性が周期的に異なるナノ構造を発現させる技術を得た。また、(Ga,Mn)As においては、無磁場で電界で磁化がスイッチする挙動も観測できた。本結果は、磁化反転に必要な安定準位間のエネルギー障壁高さを、電界で制御できている証拠となる。また、得られた無磁場で電界誘起磁化反転は準安定状態から安定状態へ遷移であるため、一度スイッチすると外部磁場のアシスト無しでは元に戻せないという問題も分かった。
5	以下のような開発を行っている。(1)スピントロニクス材料開発、(2)スピントロニクスデバイス開発、(3)革新的スピントロニクス材料・デバイス研究開発、(4)スピントロニクス集積プロセス開発、(5)スピントロニクス論理集積回路動作検証・IP 開発、(6)スピントロニクス論理集積回路設計手法・設計ツール開発、(7)スピントロニクス論理集積回路実証・拠点形成
6	ナノ磁石に電界を印加することで磁化方向をダイレクトに制御し、外部からの磁界や電流の印加を必要としない、新たな磁化スイッチング手法開発を目指した。絶縁膜を介して磁石に電圧を加えることで、室温で磁壁の移動スピードを 20 倍変えられることを初めて示し、局所的な磁極の反転スピードを大幅に向上できることに成功した。
7	「スピン(磁気)の不揮発性・高速度・安定性を利用した次世代の高機能・超低消費電力コンピューティングデバイス・システムの基盤技術の確立を目指した。新しい垂直記録媒体構造を用いてディスクの単位面積当たりの記録密度を大きく増加できることを示し、これによって必要な装置台数を大きく減少させて電力を節約することが可能になった。また、ハードディスク装置は電源を止めてもその記憶を失わない性質を利用して、データアクセスのない装置は電源を切ることで一層の省電力化が可能になることも実際のシステム試作により実証した。

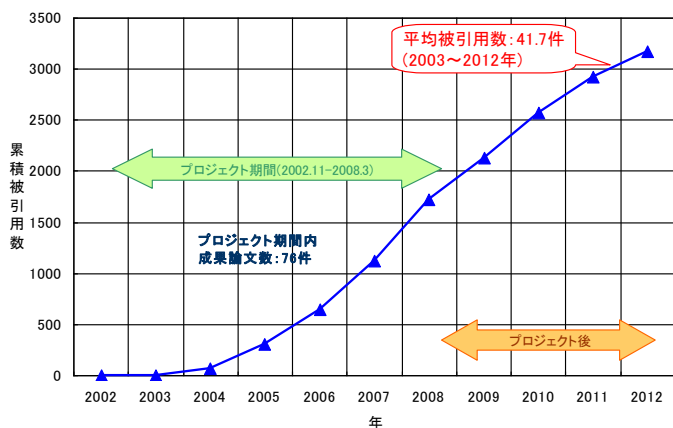
2.1.3 論文の発表状況

プロジェクト期間中の発表論文 85 件(終了報告書記載)、プロジェクト終了後のプロジェクトメンバーの発表論文は 142 件であった(プロジェクトと関係の薄い論文は除外している)。

(1) プロジェクト期間中の発表論文

プロジェクト期間中の成果論文について、累積引用論分数推移及び被引用数上位の論文を、それぞれ図 2-1、表 2-2 に示した。

累積被引用論文数推移を見ると、プロジェクト期間中とほとんど変わらず増加しており、平均被引用数も約 41 件(2003 年~2012 年)と多く、本プロジェクトのこの分野での重要性を示している。プロジェクト期間中の被引用数上位の論文を見ると、5 件中 3 件が、強磁性半導体の磁壁の動きや磁化反転に関するものであり、本プロジェクトの中心的テーマ「強磁性半導体」に関する論文の被引用数が多い結果となっている。他の 2 件は、金属酸化物系のヘテロ構造に関するものと、量子もつれ光子に関するものである。



2012年の値は検索日までにデータベースに収録された値なので、実際よりも低くなっている。Scopusで確認できた76論文で作図、計算している。

図 2-1 プロジェクト期間内の成果論文の累積被引用論文数推移 (検索日：2012/11/26)

表 2-2 プロジェクト期間内の成果論文の被引用数上位ランキング (検索日：2012/10/23)

No.	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	開始頁	終了頁	発行年	被引用件数
1.	Current induced domain wall switching in a ferromagnetic semiconductor structure	Yamanouchi M., Chiba D., Matsukura F., Ohno H.	Nature	428	6982	539	541	2004	331
	<p>概要 超高密度記憶装置を動作させるのに必要な磁界は非常に大きく、電流による磁化反転が目立っており、実際、スピン偏極電流は、ナノメートルサイズの金属構造の磁化をトルクによって反転させる。しかし、現時点では、集積回路に適用するには、$10^7-10^8 \text{Acm}^{-2}$ という高い電流密度が必要である。磁壁の操作によっても磁気的な論理ビットの書き替えが可能であるがこの場合も 10^7Acm^{-2} の電流密度を要するここでは、強磁性体において、磁界のない状態で 10^5Acm^{-2} 以下の電流パルスにより、磁壁スイッチングをとおして磁化を反転させられることを示す。現状では、スイッチング速度が小さく、強磁性転移温度が低いため、実用的レベルではないが、スイッチング速度や強磁性転移温度の課題を解決できれば、電流パルスによる磁化反転を磁気情報記憶装置に応用する道をひらくことができる。</p>								
2.	Electrical manipulation of magnetization reversal in a ferromagnetic semiconductor	Chiba D., Yamanouchi H., Matsukura F., Ohno H.,	Science	301	5635	943	945	2003	247
	<p>概要 強磁性半導体においては、低密度キャリアが強磁性相互作用に影響をおよぼす。したがって、ゲート構造を用いてキャリア密度を変化させることにより、磁化反転を起こす力を制御できる。このような電気による操作を、超高密度磁気情報記憶装置におけるナノスケールビットの磁化反転に応用できる可能性がある。</p>								
3.	Quantum Hall effect in polar oxide heterostructures	Tsukazaki A., Ohtomo A., Kita T., Ohno Y., Ohno H., Kawasaki M.	Science	315	5817	1388	1391	2007	184
	<p>概要 レーザ MBE 法により成長された極性 ZnO/MgxZn_{1-x}O のヘテロ構造の 2 次元電子ガスにおいて、シュブニコフド・ハース振動と量子ホール効果を観察した。マグネシウム成分のチューニングと成長時の極性制御により電子濃度は $0.7 \times 10^{12} - 3.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の範囲で制御できる。振動振幅の温度依存性から 2 次元電子ガスの有効質量は、自由電子質量の 0.32 ± 0.03 倍と評価した。酸化物ヘテロ構造における量子ホール効果の実証は、金属酸化物ヘテロ構造の幅広い機能と量子ホール物理を結びつける可能性を示唆する。</p>								
4.	Velocity of domain wall motion induced by electrical current in the ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As	Yamanouchi M., Chiba D., Matsukura F., Dietl T., Ohno H.	Physical Review Letters	96	9	0	0	2006	124
	<p>概要 (Ga,Mn)As における磁気光学カー(Kerr)効果により、22m/s まで 5 桁に及び変化する速度の、垂直磁気異方性における電流誘起磁壁運動を観察した。磁壁のスピンフリップ遷移由来のトルクによるスピン移行と、スロンチエフスキ機構によるスピン転送の理論を裏付けるデータとなった。低電流域における、磁壁の低速移動(creep)を実際に観測することができた。</p>								
5.	Generation of ultraviolet entangled photons in a semiconductor	Edamatsu K., Oohata G., Shimizu R., Itoh T.	Nature	431	7005	167	170	2004	106
	<p>概要 量子情報通信技術において、量子もつれはキーとなる概念の一つである。最も高頻度に、高度にもつれた光子対を生成する方法はパラメトリックダウンコンバージョンである。一方、3-4 個の光子間のもつれを生成するためには、短波長光子を用いることが望ましい。しかし、エネルギーの大きい光子対については、ダウンコンバータで生成させることが難しい。このような場合 RHPS (hyperparametric scattering) が適用可能な方法の一つ期待され、半導体ベースのもつれ光子生成のソースは量子技術応用にも優位性をもつが、半導体内にもつれ光子を生成する試みはこれまで成功していなかった。ここでは、CuCl における双エキシトン共鳴 RHPS による、紫外もつれ光子対の生成を実験的に確認した。この結果は、電流による単一光子発生過程と同じように、電流注入によるもつれ光子対を生成する手法の開発につながる可能性がある。</p>								

・太字著者：責任著者(赤字：プロジェクト参画メンバー)

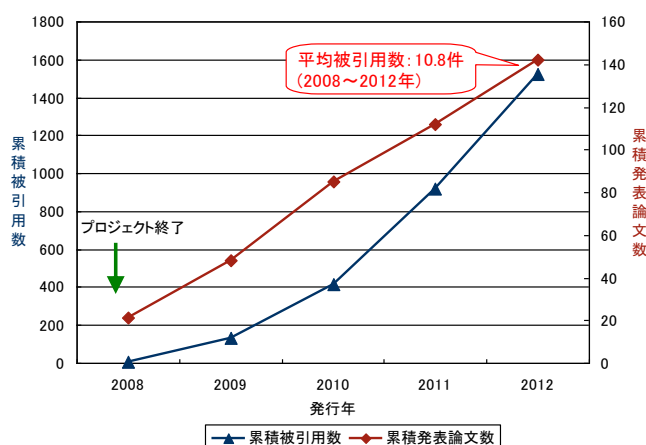
(2) プロジェクト終了後の発表論文

プロジェクト終了後の論文について、累積発表論文数と累積引用数推移、累積共著者数推移を、それぞれ図 2-2、図 2-3 に示し、プロジェクト終了後での研究の活性度を測る参考とした。また、被引用数上位の論文を表 2-3 に示した。

累積発表論文数と被引用論文数推移を見るとプロジェクトメンバーによる関連論文は、プロジェクト終了後もコンスタントに約 30 件/年と数多く発表されており、プロジェクトの成果が終了後も順調に展開されていると言える。また、被引用数も大きく増加しており、調査日までの 5 年弱で約 1,700 件に達している。

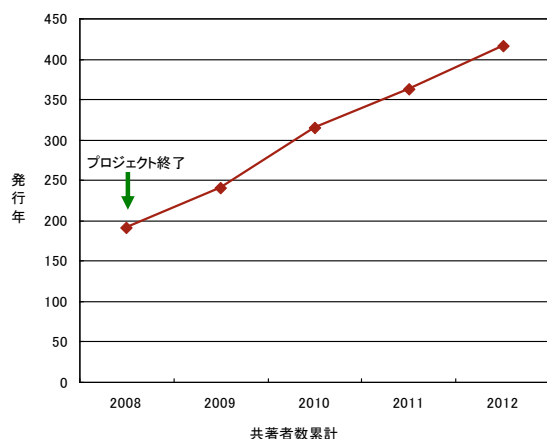
累積共著者数においても、プロジェクトメンバーによるプロジェクト終了後の関連論文の累積共著者数は毎年コンスタントに増加しており、プロジェクト成果に関する人材が広がって同分野の研究が進展していることを示していると思われる。

プロジェクト終了後に発表された論文の被引用数上位の論文を見ると、1 位～5 位中 3 件(1 位、2 位、4 位)が磁気トンネル接合に関するものであり、材料は金属及び金属酸化物系のヘテロ構造で、ERATO の成果を実デバイスに応用する方向の論文である。3 位の論文は、磁壁操作、磁壁運動に関するもので、プロジェクトの中心的テーマを引き継いだ発表である。5 位の論文は、プロジェクトの非磁性半導体のテーマの延長となる研究にもとづいており、光子と電子スピンの相互作用に関する発表である。



2012年の値は検索日までにデータベースに収録された値なので、実際よりも低くなっている。

図 2-2 プロジェクト終了後の累積発表論文数と累積被引用数推移(検索日: 2012/11/26)



2012年の値は検索日までにデータベースに収録された値なので、実際よりも低くなっている。

図 2-3 プロジェクト終了後の発表論文の累積共著者数推移(検索日: 2012/11/26)

表 2-3 プロジェクト終了後の発表論文の被引用数上位ランキング(検索日：2012/11/26)

No.	タイトル	著者	掲載誌	巻	号	開始頁	終了頁	発行年	被引用件数
1.	Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeBMgOCoFeB pseudo_spin_valves annealed at high temperature	Ikeda S. , Hayakawa J., Ashizawa Y., Lee Y.M., Miura K., Hasegawa H., Tsunoda M., Matsukura F. , Ohno H.	Applied Physics Letters	93	8	-	-	2008	232
	<p>概要 525°Cでアニールした Ta/Co₂₀Fe₆₀B₂₀/MgO/Co₂₀Fe₆₀B₂₀/Ta の擬スピンバルブ構造の磁気トンネル接合において、TMR 比 604%(300K)を観察した。高い TMR 比を得るためには、Ta の拡散を抑えながら 500°C 以上でアニールすることが重要であることがわかった。また、X 線回折により MgO のバリア性が改善されていることを確認した。TMR 比の最高値は 1144%(5K)であった。</p>								
2.	A perpendicular_anisotropy CoFeB_MgO magnetic tunnel junction	Ikeda S. , Miura K., Yamamoto H., Mizunuma K., Gan H.D., Endo M., Kanai S., Hayakawa J., Matsukura F. , Ohno H.	Nature Materials	9	9	721	724	2010	192
	<p>概要 次世代不揮発メモリに、垂直磁気異方性をもつ強磁性電極を採用することが期待され、多くの材料が検討されたが、これまで、要求特性をすべて満足する材料は得られていない。ここでは、強磁性電極と、CoFeB_MgO 系のトンネルバリア間の界面垂直磁気異方性を検討した。CoFeB_MgO 系材料は、平面磁気異方性において巨大磁気抵抗効果を得る材料として広く採用されている。Ta/CoFeB/MgO/CoFeB/Ta の垂直 MTJ により、TMR 比 120%以上、高い熱安定性、直径 40nm 以下のサイズ、スイッチング電流 49 μA を確認した。</p>								
3.	Magnetization vector manipulation by electric fields	Chiba D. , Sawicki M., Nishitani Y., Nakatani Y., Matsukura F. , Ohno H.	Nature	455	7212	515	518	2008	152
	<p>概要 磁化の制御を、半導体デバイスと互換性をもつ形で行うために、電界を用いて磁化を制御する技術の実現が望まれる。筆者らは、(Ga,Mn)As において、電界のみで磁化の操作が可能なることを示した。強磁性半導体(Ga,Mn)As における磁化の方向を決定する磁気異方性は、同半導体のキャリア(ホール)濃度に依存する。MOS 構造を用いて電界を印加することで、ホール濃度、したがって磁気異方性を制御できる。すなわち、磁化の方向を操作することが可能となる。</p>								
4.	Electric field effects on thickness dependent magnetic anisotropy of sputtered MgO/Co40Fe40B20/Ta structures	Endo M. , Kanai S., Ikeda S., Matsukura F. , Ohno H.	Applied Physics Letters	96	21	-	-	2010	50
	<p>概要 MgO と Ta に挟まれた Co40Fe40B20 の厚さに依存する磁気異方性に対する印加電界の影響を調べた。CoFeB の厚さは、2nm 以下の範囲で変化させた。厚さが減少すると、磁化容易軸は、平面内から垂直に変化する。平面内に磁化容易軸をもつ試料の磁気異方性と、磁化容易軸が垂直な試料における保持力(coercivity)は、室温において印加電界に依存すること、さらに CoFeB 層の厚さが 0.9nm より薄くなると、ブロッキング温度(blocking temperature)以下で超常磁性現象を示すことを明らかにした。</p>								
5.	Coherent transfer of light polarization to electron spins in a semiconductor	Kosaka H., Shigyou H., Mitsumori Y., Rikitake Y., Imamura H., Kutsuwa T. , Arai K. , Edamatsu K.	Physical Review Letters	100	9	-	-	2008	48
	<p>概要 半導体における電子又はホールのスピンの歳差運動周期に同期させることにより、タイムピン状態と呼ばれる二つの光パルスがコヒーレントに重なった量子状態が、電子スピンのアップ/ダウンに転送できることを示した。タイムピン状態の転送には、偏光の縮退は関係せず、偏光のみを利用する手段では直接到達できない電子スピンの状態への、タイムピン状態からのマッピングを可能とする。このような転送スキームは、量子状態における光子と電子の新たな関係へのアプローチとなる。</p>								

- ・プロジェクト研究内容と関係の薄い論文は除外している。及び内容的に Review に近いものは除外した
- ・太字著者：責任著者(赤字：プロジェクト参画メンバー)

2.1.4 特許の出願・登録状況

(1) プロジェクトの特許出願

大野半導体スピントロニクスプロジェクトでは、プロジェクト期間中に表 2-4 に示す 3 ファミリーの特許を出願しており、3 ファミリーとも国際出願を行っている。

これら 3 件の特許について、その概要を述べる。

1) 出願番号：W02005JP336

名称：「電流注入磁壁移動素子」

発明者：大野英男、松倉文礼、千葉大地、山ノ内路彦

出願人：東北大学、科学技術振興機構

強磁性体の磁化反転に必要な外部磁場をなくし、消費電力の省力化を図ることができる電流注入磁壁移動素子を提供する特許で、従来外部磁場の印加により行われていた記憶媒体等に利用される

磁性体の磁化反転を、電流により行う技術を提示している。請求項には、材料として(Ga, Mn)As と (In, Mn)As が示され、素子の基本的構成と好適な電流密度等が開示されている。

同プロジェクトの中心的テーマである「強磁性半導体」の研究成果に直結する出願である。

請求項 1 と 2 には、具体的な材料や電流密度などの記載はなく、磁性半導体を用いた電流注入磁壁移動素子の基本概念を提供している。米国では登録が確定しており、欧州、ドイツ、韓国では登録されているが、日本においては拒絶査定に対して不服審判中となっている。成立すれば、電流注入磁壁移動素子の基本特許となり得る内容である。

2) 出願番号：特願 2004-140503

名 称：「リトロー型外部共振器半導体レーザーにおける光軸のずれの補正方法及び装置」

発 明 者：高見澤昭文、枝松圭一

出 願 人：科学技術振興機構

リトロー型外部共振器半導体レーザーにおける光軸のずれを簡単に、安価に、かつ的確に補正することができる技術を提供する特許で、半導体レーザー、回折格子、プリズムなどを含む光学系の構成を開示している。通常の単一波長半導体レーザーは、半導体チップ内部に共振器をもつが、本特許はリトロー型と呼ばれる回折格子を用いた外部共振器を用いた波長可変レーザーに関する出願である。

半導体量子ドットの分光、量子情報処理などの分野では、波長可変レーザーが用いられるが、従来のリトロー型外部共振器には、波長の変化に伴って出力光の光軸がずれるという難点があった。本特許は、このような問題を解決する技術に関するもので、大野半導体スピントロニクステーマ「非磁性半導体」の半導体におけるスピン・角運動量を利用した量子もつれ光子等の研究につながるものである。この出願及びこれを優先権主張した W02005JP7675 が日本、米国、欧州で登録されている。

3) 出願番号：W02008JP68044

名 称：「不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリ」

発 明 者：大野英男、松倉文礼、千葉大地

出 願 人：東北大学、科学技術振興機構

電気的手法によって情報を記録可能な磁気メモリ素子とその記録方法に関する特許で、電界効果による磁気異方性変調を介した磁化反転に必要な材料と基本構成及び動作原理を開示している。

既に述べた同プロジェクト期間内に出願された特許「電流注入磁壁移動素子」では、磁界ではなく電流により磁壁を移動させるという新規な動作原理に基づく素子を提示しているが、この素子においては電流ではなく電界で磁化反転を行うというものである。電流を用いた動作では消費電力の低減に課題があるが、電界を用いた場合は消費電力を大幅に削減できる。

近年、情報機器のデータ処理能力の向上とともに、その消費電力の増大が問題となっており、現在メインメモリとして使用されている DRAM を不揮発にすることによる低消費電力化が注目されている(リフレッシュ電力の削減)。この状況のもと、フラッシュメモリ並かそれ以上の高集積化が可能で、フラッシュメモリより、高速かつ書き換え回数の大きい次世代メモリの開発が加速している。本特許は、そのような次世代メモリの候補の一つである磁気メモリに関連している。

(2) プロジェクト終了後の特許出願

プロジェクト終了後出願された特許で、現在までに公開されている特許は26ファミリーであり、その中で最新の優先権主張日は、2010年12月22日となっている。したがって、プロジェクト終了後約3年間に26ファミリーの出願が行われたことになり、プロジェクトの特許として最終報告書に記載された3ファミリーに比べて大幅に増加している。出願内容を見ると、量子カスケードレーザに関するものと光子対の発生に関するものが各1件、合計2件以外は、すべて磁気メモリ及び磁気メモリの製造方法に関する出願である。また磁気メモリに関する特許はすべて企業との共同出願か企業が出願人となったものである。

このような特許出願動向は、プロジェクト終了後その後継となる研究が実デバイスへの応用に向けて大きく進展していることを示している。

表 2-4 プロジェクトの特許出願・審査状況(検索日：2012/11/17)

プロジェクト期間内出願分(研究終了報告書記載分)

No.	特許タイトル	優先権主張日 (出願日)	出願番号	公開番号	登録番号	法的状況	出願人 (権利者)	備考		
国内 出願	1	リトロー型外部共振器 半導体レーザーにおける 光軸のずれの補正 方法及び装置	2004/5/11	特願 2004-140503	特開 2005-322813	3795500	登録・存続	JST		
国際 出願	2	電流注入磁壁移動素 子	2004/1/15	WO2005JP336		WO2005069368	—	JST、東北 大学	終了報告書記 載の特願 2004-7514 を優 先権主張 EP 指定国: ドイ ツ	
				各国 段階	日本	WO2005/069368				拒絶査定 不服審判中
				米国	US20080137405		登録確定			
				欧州	EP1708257	EP1708257	登録・存続			
				ドイツ		DE602005024917	登録・存続			
	韓国	KR1020070030741	KR101122496	登録・存続						
	3	LITTRON XTERNAL OSCILLATOR SEMICONDUCTOR LASER OPTICAL AXIS DEVIATION CORRECTION METHOD AND DEVICE	2004/5/11	WO2005JP7675		WO2005109586	—	JST	終了報告書記 載の特願 2004-140503 を 優先権主張	
				各国 段階	米国	US20080031293	US7706425			登録・存続
				欧州	EP1746693	EP1746693	登録・存続			
	オーストリア		AT527729		審査中					
4	不揮発性固体磁気メ モリの記録方法及び不 揮発性固体磁気メモリ	2007/10/11	WO2008JP68044		WO2009048025	—	JST、東北 大学	終了報告書記 載の特願 2007-265747 を 優先権主張		
			各国 段階	日本	WO2009/048025				審査中	
			米国	US20100246252	US8310867	登録・存続				

プロジェクト終了後出願分

No.	特許タイトル	優先権主張日 (出願日)	出願番号	公開番号	登録番号	法的状況	出願人 (権利者)	備考	
国内 出願	5	量子カスケードレーザ	2008/2/6	特願 2008-026653	特開 2009-188197		みなし取下げ	旭化成 エレクトロニクス、 東北大学	
	6	共鳴トンネル磁気抵抗効果素子、磁気メモ リセル及び磁気ランダムアクセスメモリ	2008/8/8	特願 2008-205905	特開 2010-045060	5030888	登録・存続	日立製作所、 東北大学	
	7	磁気メモリセル及び磁気ランダムアクセ スメモリ	2008/12/9	特願 2008-313679	特開 2010-140973	5075802	登録・存続	日立製作所	
	8	磁気抵抗効果素子、それをを用いた磁気メ モリセル及びランダムアクセスメモリ	2010/1/26	特願 2010-014576	特開 2011-155073	4903277	登録・存続	日立製作所、 東北大学	
	9-1	磁気抵抗効果素子及び磁気メモリ	2010/6/4	特願 2010-129086	特開 2011-258596		審査未請求	日立製作所、 東北大学	No.9-2
	10	不揮発機能メモリ装置	2011/2/25	特願 2012-007375	特開 2012-190530		審査未請求	東北大学	

No.	特許タイトル	優先権主張日 (出願日)	出願番号	公開番号	登録番号	法的状況	出願人 (権利者)	備考
11	Magnetoresistive element, magnetic memory cell and magnetic random access memory using the same	2008/8/5	US2008185983	US20100034014	US8274818	登録・存続	東北大学、日立製作所	
12	トンネル磁気記録素子、磁気メモリセル及び磁気ランダムアクセスメモリ	2009/3/6	WO2009JP001017 各国段階 日本	WO2010100678 WO10/100678	—	— 審査中	日立製作所	
13	光子対生成装置及び光子対生成方法	2008/5/1	WO2009JP058333 各国段階 日本 米国 欧州	WO2009133877 US20110038033 EP2275862	—	— 審査中 審査中	大阪府立大学	特願 2008-119854 を 優先権主張
14-1,2	トンネル磁気抵抗効果素子、それを用いた磁気メモリセル及びランダムアクセスメモリ	2009/4/28	WO2009JP058335 各国段階 日本	WO2010125641 WO10/125641	—	— 審査中	東北大学、日立製作所	
14-3	Tunneling magnetic resistance effect element, and magnetic memory cell and random access memory using the element	2009/4/28	TW201011330	TW201121034			東北大学、日立製作所	WO2009JP58335 を優先権主張
15-1	TUNNEL MAGNETIC RESISTANCE EFFECT ELEMENT AND RANDOM ACCESS MEMORY USING SAME	2009/6/8	WO2009JP60432	WO2010143248	—	—	日立製作所	
15-2	Tunnel magnetic resistance effect element and random access memory using same	2009/6/8	TW2010118380	TW201123570			日立製作所	WO2009JP60432 を優先権主張
16	多層積層フリップ構造を備えた磁気抵抗効果素子、磁気メモリ及び磁気ランダムアクセスメモリ	2008/8/28	WO2009JP064661 各国段階 日本	WO2010024201 WO10/024201	—	— 審査中	日立製作所、東北大学	特願 2008-219998 を 優先権主張
17	RESONANT TUNNELING MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT, MAGNETIC MEMORY CELL, AND MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY	2009/9/24	WO2009JP66550	WO2011036752	—	—	東北大学、日立製作所	
18	TUNNEL MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT, AND MAGNETIC MEMORY CELL AND MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY EMPLOYING SAME	2010/5/20	WO2010JP3397	WO2011145146	—	—	日立製作所	
19-1	METHOD FOR MANUFACTURING MAGNETORESISTIVE ELEMENT	2009/9/9	WO2010JP5442	WO2011030529	—	—	アルバック、東北大学	特願 2009-207939 を 優先権主張
19-2	Magnetoresistance element manufacturing method	2009/9/9	TW2010130368	TW201140573			アルバック、東北大学	特願 2009-207939 を 優先権主張
20-1	METHOD FOR MANUFACTURING MASTER DISK FOR MAGNETIC TRANSFER	2009/10/23	WO2010JP5618	WO2011048746	—	—	アルバック、東北大学	特願 2009-244090 を 優先権主張
20-2	Master for magnetic printing manufacturing method	2009/10/23	TW2010133141	TW201120878			アルバック、東北大学	特願 2009-244090 を 優先権主張
21-1,2	磁気抵抗効果素子及びそれを用いたランダムアクセスメモリ	2009/5/28	WO2010JP059066 各国段階 日本	WO2010137679 WO10/137679	—	— 審査未請求	日立製作所、東北大学	特願 2009-128737 を 優先権主張
21-3	Magneto-resistance effect element and random access memory using same	2009/5/28	TW2010117217	TW201123569			日立製作所、東北大学	特願 2009-128737 を 優先権主張
22	MAGNETIC MEMORY CELL AND MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY	2010/7/9	WO2010JP61667	WO2012004882	—	—	東北大学、日立製作所	
23	MAGNETORESISTIVE EFFECT ELEMENT AND RANDOM ACCESS MEMORY USING SAME	2010/7/9	WO2010JP61669	WO2012004883	—	—	東北大学、日立製作所	
9-2	MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY	2010/6/4	WO2011JP62493	WO2011152400	—	—	東北大学、日立製作所	特願 2010-129086 を 優先権主張 No.9-1 とファミリー
24	PROCÉDÉ DE TRAITEMENT D'UNE ÉLECTRODE STRATIFIÉE	2009/12/8	WO2010JP71861	WO2011071028	—	—	アルバック、東北大学	特願 2009-278724 を 優先権主張
25-1	METHOD FOR PRODUCING TUNNELING MAGNETORESISTANCE ELEMENT	2010/12/22	WO2011JP7105	WO2012086183	—	—	アルバック、東北大学	特願 2010-286112 を 優先権主張 No.34 とファミリー
25-2	Manufacturing method of tunnel magnetoresistance element	2010/12/22	TW2011147681	TW201230425			アルバック、東北大学	特願 2010-286112 を 優先権主張 No.33 とファミリー

国際出願

No.	特許タイトル	優先権主張日 (出願日)	出願番号	公開番号	登録番号	法的状況	出願人 (権利者)	備考	
国際出願	26	MAGNETORESISTIVE EFFECT ELEMENT, AGNETIC MEMORY CELL USING SAME, AND RANDOM ACCESS MEMORY	2010/1/26	WO2011JP51264	WO2011093252	-	-	東北大学、日立製作所	特願 2010-1457 を優先権主張
	27	TUNNEL MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT, AND MAGNETIC MEMORY CELL AND MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY EMPLOYING SAME	2010/2/4	WO2011JP51480	WO2011096312	-	-	日立製作所	特願 2010-23041 を優先権主張
	28	MAGNETORESISTIVE ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY	2010/3/10	WO2011JP52999	WO2011111473	-	-	東北大学、日立製作所	特願 2010-53226 を優先権主張
	29	MAGNETIC MEMORY CELL AND MAGNETIC RANDOM ACCESS MEMORY	2010/3/5	WO2011JP53324	WO2011108359	-	-	東北大学、日立製作所	特願 2010-49562 を優先権主張
	30	MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY	2010/6/3	WO2011JP62119	WO2011152281	-	-	東北大学、日立製作所	特願 2010-128051 を優先権主張

2.1.5 招待講演

プロジェクト期間中の招待講演は海外 179 件、国内 35 件であった(プロジェクト終了報告書に成果として記載)。プロジェクト終了後はそれぞれ海外 111 件、国内 13 件となっている。ただし、研究者が研究室の HP や各種報告書等に必ずしも全件記載しているとは限らないので、あくまで参考の数字である。このことを前提として件数を比較すると、1 年当たりの招待公演数は期間中において、海外約 30 件、国内約 6 件、期間後は、海外約 22 件、国内約 3 件と期間後はやや減少しているが、大野英男及び主要メンバーの千葉大地と松倉文礼について見ると、期間後に 1 年当たりの招待件数が増加している。

海外講演発表者の内訳は次のとおりである。講演タイトルに複数の氏名が記載されている場合は筆頭者を発表者とした。

➤ プロジェクト期間中の招待講演(海外、招待セミナー等を含む)

- ・大野英男(研究総括)：90 件
- ・千葉大地：8 件
- ・松倉文礼：2 件
- ・大畠悟郎：2 件
- ・その他：77 件

➤ プロジェクト終了後の招待講演(海外、招待セミナー等を含む)

- ・大野英男(研究総括)：83 件
- ・千葉大地：16 件
- ・松倉文礼：12 件

2.1.6 各研究テーマの現在の状況のまとめ

(1) 強磁性半導体

本プロジェクトのメンバーによる論文発表は、プロジェクト終了後も活発な状況が続いている。最近のテーマはメモリに関するものが圧倒的に多く、プロジェクト期間内の基礎研究から、同プロジェクトの成果を次世代メモリに応用する方向に、研究の重点がシフトしつつある。強磁性半導体

は同プロジェクトの中心テーマで、代表的な研究対象となった(Ga, Mn)As では、Mn の磁化が小さいため、通常の金属磁性体に比べてスピントルクの影響が相対的に大きく、磁壁 が電流の極性を変えるごとに左右に移動することを観測することができた。この研究に端を発して金属磁性体でも同様の現象が見られることがわかり、論文の対象となる材料は、最近、金属及び金属酸化物系が多くなっている。

直系といえる(Ga, Mn)As の研究については、プロジェクト終了後も、東北大学の 大野英男研究室を中心に続けられ、例えば、トランジスタ(EDLT : Electric Double Layer Transistor)の形での評価に関する論文が発表されている。この論文では、(Ga, Mn)As をチャネルとする EDLT を作成し、(Ga, Mn)As チャネルのシートコンダクタンスを測定している。(Ga, Mn)As チャネルのシートコンダクタンスはゲートバイアスにより変化し、その特性はヒステリシスを示す結果となっている。また、ゲート電圧-1V~3V の範囲で、キュリー温度も 14K 変化することを報告している³⁷⁾。

(2) 非磁性半導体

スピンの量子的振る舞いが非磁性半導体の中では顕著に表われるので、これを制御することにより、新しい情報通信技術や量子計算機の実現を目指そうとするテーマで、論文数は磁性体関連にはほど多くないがプロジェクト終了後も論文が発表されている。研究は、量子力学的解釈にかかわる理論面と応用に向けた実験の両面で進められており、実験は、東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設が中心に行われている。

量子コンピューティングには、必要な時に要求どおりもつれ光子を発生させる光源の実現がキーポイントとなり、このテーマに関連して次のような報告がある³⁸⁾。

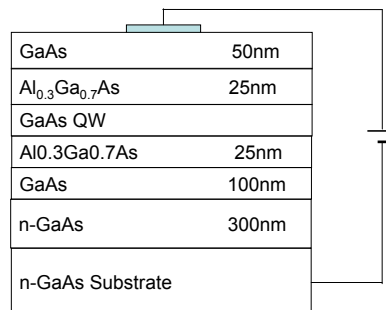


図 2-4 GaAs 量子ドットを用いたショットキーダイオード

図 2-4 は GaAs/AlGaAs 系における単原子層のゆらぎによって生成される GaAs の量子ドットを利用したショットキーデバイスである。研究グループはこのデバイスに垂直に電界をかけることで、量子ドットの励起子微細構造の分裂をおよそ $1.5 \mu\text{eV}$ に抑えることができ、GaAs 量子ドットを用いた可視量子もつれ光子対を発生させる方法の糸口を得たと報告している。このような研究はコンピュータや暗号通信の実用化につながるものである。

(3) 材料開発

電圧あるいは電流により磁化を反転させるという現象を強磁性半導体という自然界に存在しない材料で実証した本プロジェクトの成果は、今後のエレクトロニクスの進展の上で大きなパラダイ

ム変化をもたらすものとして今後の研究開発が注目されている⁴。しかし、同プロジェクトでの実証は低温下のものであり、室温以上で動作するメモリなどの実デバイスへの応用することはできない。材料開発というテーマの最大の目的は、室温以上のキュリー点をもつ強磁性半導体の実現であったと考えられるが、この点に関するプロジェクト終了後の報告は見当たらない。

しかし、室温以上のキュリー点をもつ磁性半導体の実現を目指す研究者は多く、大野英男グループ以外から同分野での報告がしばしば見られ、そのほとんどが大野半導体スピントロニクス成果を引用している。このように同プロジェクトの成果が新規な研究領域を創出している。

確かに室温以上のキュリー点をもつ強磁性半導体を実現することができれば、新規デバイスに対して大きな可能性が広がるが、例えば DRAM を置き換えることが可能な不揮発メモリの開発を想定した場合、必ずしも強磁性を有する材料が半導体である必要はない。優れた MTJ ができればスピン注入という大野半導体スピントロニクスが現実のものとした現象を利用して次世代メモリを生み出すことが可能となる⁵。

プロジェクトが強磁性半導体に対して実証した垂直磁化容易軸を有する磁性膜での電流誘起磁壁移動は集積回路への応用に向けて室温で動作する垂直磁化容易強磁性金属の電流誘起磁壁移動の活発な研究につながっている。また、強磁性半導体を対象として始まった磁性の電界制御の研究は、現在最もホットな話題の一つである金属強磁性体の電界誘起磁化反転の研究につながった。

最近検討されている材料の例として CoFeB を取り上げ、成果のポイントを述べる。CoFeB は標準的な材料であるが、ある膜厚以下で垂直容易軸が発現するとともに、高い熱処理安定性があり、実デバイス向けの材料として注目されている。

大野英男らの研究グループは、垂直方向に磁化された CoFeB を用いて電流注入による磁壁の動きを確認した³⁹⁾。図 2-5 の左は実験に用いたデバイスの図で、右の図は電流によるホール抵抗の変化で磁壁が動くことを示している。研究グループはこの結果は磁壁の移動を利用したデバイス実現の可能性につながるものと考えている。

また、垂直方向に磁化された CoFeB に電界を印加することによる磁気異方性の変調により誘起される磁化の歳差運動を介して磁化反転が可能であることを示した⁴⁰⁾。これはスピントロニクスデバイスの省電力化につながるものである。

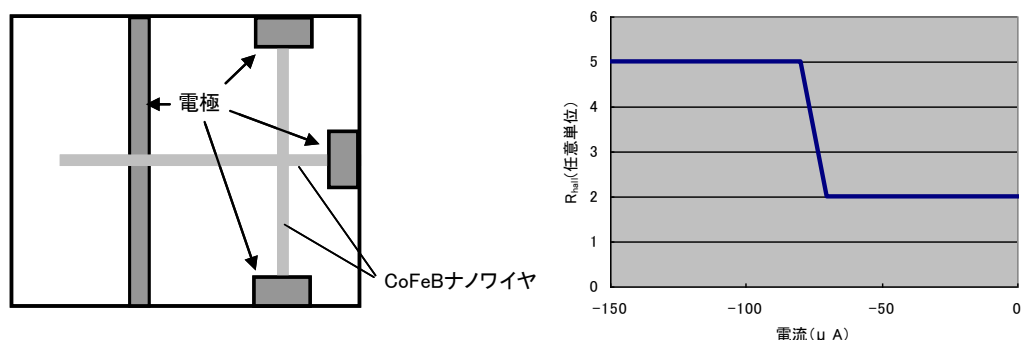


図 2-5 垂直方向に磁化された CoFeB における電流によるホール抵抗の変化

4 ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクト事後評価報告書

5 応用物理 第 81 巻 第 7 号 (2012)p589-p592 “半導体と磁性体に橋を架ける”

2.2 プロジェクトメンバーの活動状況

プロジェクトの人材育成の効果や、学会、社会へのインパクトを明らかにするため、プロジェクトメンバーのプロジェクトに関連した受賞状況と動静を調査した。

2.2.1 調査方法

プロジェクトの人材育成の効果や学会、社会へのインパクト等を明らかにするため、プロジェクトメンバーのプロジェクトに関連した受賞状況と動静を調査した。下記(1)、(2)に調査方法の詳細を記す。

(1) 受賞状況

下記 Web サイトを調査した。

- ・調査対象者の所属する研究室や本人の Web サイト
- ・Read&Researchmap の研究者検索サイト(受賞欄)⁶
- ・Google 等の検索サイト

(2) プロジェクトメンバーの動静

プロジェクトメンバーのプロジェクト終了後の動静を下記 Web サイトで調査した。

- ・プロジェクト終了時の所属機関のサイト(研究室の Web サイト、大学の研究者情報データベース、教員紹介 Web サイト等)
- ・Read&Researchmap の研究者検索サイト⁷
- ・KAKEN 科学研究費助成事業データベース⁸
- ・Scopus Author search
- ・Google 等の検索サイト
- ・学術研究データベース・リポジトリ⁹

プロジェクト期間中及び終了後に学位を取得した可能性のあるプロジェクトメンバーの学位論文を検索する。

2.2.2 受賞状況

プロジェクトメンバーのプロジェクト終了後の受賞状況を表 2-5 に示した。

研究総括であった大野英男は、2011 年にトムソン・ロイター引用栄誉賞を受賞している。同賞は、過去 20 年以上にわたる学術論文の被引用数に基づいて、各分野の上位 0.1%にランクされる研究者の中から選ばれ、ノーベル賞の分野で特に注目すべき研究領域のリーダーの中から、総被引用数とハイインパクト論文の数から候補者が決定される。

また、同教授には、IEEE 関連で 2 件の受賞がある。1 件は、磁性、特にナノサイエンス及びナノエレクトロニクスに関わるスピントロニクス分野の業績により、2009 年に IEEE Magnetics

6 <http://researchmap.jp/search/>

7 <http://researchmap.jp/search/>

8 <http://kaken.nii.ac.jp/r?>

9 http://dbr.nii.ac.jp/infolib/meta_pub/G9200001CROSS

Society(米国)より受賞した Distinguished Lecturer for 2009 である。他の 1 件は、2012 年に IEEE(米国)より受賞した David Sarnoff Award で、半導体エレクトロニクスと磁性・スピントロニクスの融合に対する貢献とリーダーシップが認められたものである。さらに同教授は 2012 年に第 33 回本多記念研究奨励賞と応用物理学会業績賞を受賞している。

また、千葉大地が若手研究者に贈られる賞をプロジェクト終了後 4 件受賞している。第 4 回凝縮系科学賞(2009 年)、第 24 回安藤博記念学術奨励賞(2011 年)、サー・マーティン・ウッド賞(2012 年)、第 33 回本多記念研究奨励賞(2012 年)の 4 つの賞である。

同じく若手のもとメンバー松坂俊一郎が、電子濃度の異なる n 型 GaAs におけるスピンホール効果の評価において、第 28 回(2010 年春季)応用物理学会講演奨励賞を受賞している。

表 2-5 主要な受賞(検索日:2012/10/12)

No.	受賞者	賞名	授賞機関(国名)	受賞年	受賞理由	備考
1	大野英男	応用物理学会業績賞	応用物理学会	2012	半導体スピントロニクスにおける先駆的研究	当該研究分野において飛躍的な発展を遂げ、他の研究分野にまで影響を及ぼした研究・開発業績又は学生・若手研究開発者のレベルアップに広くかつ特別に大きく貢献した教育業績を対象に授与
2	大野英男	IEEE David Sarnoff Award	IEEE(米国)	2012	半導体エレクトロニクスと磁性・スピントロニクスの融合に対する貢献とリーダーシップが認められたもの	exceptional contributions to electronics
3	千葉大地	第 33 回本多記念研究奨励賞	公益財団法人本多記念会	2012	強磁性半導体・強磁性金属における磁気相転移の電界制御	理工学特に金属及びその周辺材料に関連する研究を行い、優れた研究成果又は発明を行った者で、将来の発展を期待できる若い研究者に贈られる賞
4	千葉大地	サー・マーティン・ウッド賞	ミレニアム・サイエンス・フォーラム(日英の科学技術交流のためのフォーラム)	2012	半導体と金属における強磁性の電界制御	日本の研究機関において凝縮系科学(固体物理学、無機・有機固体化学、材料科学、表面物理などにおいて優れた業績を上げた 40 歳以下の若手研究者
5	大野英男	トムソン・ロイター引用栄誉賞	トムソン・ロイター	2011		ノーベル賞分野において、学術文献引用データベース「Web of Science®」に基づき、最も影響力があった研究者(過去 20 年以上にわたる学術論文の被引用数に基づいて、各分野の上位 0.1 パーセントにランクする研究者の中から選出)
6	千葉大地	第 24 回安藤博記念学術奨励賞	一般財団法人安藤研究所	2011	電界による磁性の制御	エレクトロニクスの振興を図るため、今後の技術開発の担い手となる有能な若手研究者へ授与
7	松坂俊一郎	第 28 回(2010 年春季)応用物理学会講演奨励賞		2010	電子濃度の異なる n 型 GaAs におけるスピンホール効果の評価	
8	大野英男	Distinguished Lecturer for 2009	IEEE Magnetics Society(米国)	2009	磁性、特にナノサイエンス及びナノエレクトロニクスに関わるスピントロニクス分野の業績	磁性の科学技術に貢献をした研究者に与えられる称号
9	千葉大地	第 4 回凝縮系科学賞	凝縮系科学賞選考委員会	2009	強磁性半導体の電界効果に関する研究	凝縮系科学に従事する優れた若手研究者を奨励

2.2.3 プロジェクトメンバーの動静

調査は 2012 年 10 月 12 日～2012 年 10 月 20 日に実施した。

今回の調査で判明したプロジェクト終了時からのキャリアアップを以下に示す()内はプロジェクトでの職位)。

- ・松倉文礼(グループリーダー)：東北大学電気通信研究所 准教授 ⇒ 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授
- ・沈 愛東(研究員)：ニューヨーク市立大学 助教 ⇒ ニューヨーク市立大学 准教授
- ・森田 健(研究員)：徳島大学 助教 ⇒ 徳島大学 特任講師
- ・千葉大地(研究員)：科学技術振興機構 研究員 ⇒ 京都大学大学院 准教授
- ・邱 博文(研究員)：国立清華大学(台湾) 助教 ⇒ 国立清華大学(台湾) 教授

2.2.4 プロジェクトメンバーの活動状況のまとめ

本プロジェクトのメンバーは、研究総括1名、グループリーダー1名、研究員13名、非常勤技術員1名であったが(研究補助員を除く)、今回の調査で現況が判明したのは、14名(内、職位不明2名)であった。職位が判明した12名のうち、6名がキャリアアップしている(残り5名は同職位、2名は不明)。大野英男は、プロジェクト終了後もこの分野で活発な研究活動を続けており、トムソン・ロイター引用栄誉賞を始め4つの賞を受賞している。また、3件の競争的研究資金を獲得し、その内最も金額の大きい(34億円/5年間)内閣府の最先端研究開発支援プログラムの「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発¹⁰⁾」は、東北大学をベースに現在も19名のメンバーで推進されている(その中に大野半導体スピントロニクスプロジェクトのメンバーは、大野英男以外含まれていない)。不揮発性スピントロニクス素子と半導体集積回路の融合を目指すプロジェクトで、本プロジェクトの成果を、実デバイスへの応用という形で引き継いだものである。

その他のメンバーも、松倉文礼、千葉大地を中心に、競争的資金獲得、招待講演、論文発表などの実績がある。残りの若手メンバーも活発に論文発表を行っている。

10 東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンターホームページ
<http://www.csis.tohoku.ac.jp/japanese/index.html>

第3章 プロジェクト成果の波及と展望

プロジェクトの成果そのものではなく、プロジェクトの成果や人材がプロジェクト外に及ぼす影響を第2章に記載した調査結果と、文献調査^{*1}、新聞情報調査^{*2}及びインターネット調査の結果を合わせて考察・記載した。大きく「科学技術への波及と展望」と「社会経済への波及と展望」の2つに分け、将来の展望、研究戦略上の位置づけ、研究成果や技術の実現可能性及び研究推進の意義についても調査の結果から導き出して記述している。

*1 ①プロジェクトに関連する報告書類、②プロジェクトメンバーらによる解説文献、総説、原著論文等及び③プロジェクトに関連した、獲得した競争的研究資金の報告書類等

*2 日経テレコン21データベースにより検索

3.1 科学技術への波及と展望

本プロジェクトの成果の科学技術への波及は、プロジェクト期間中から始まっている。プロジェクトにおいてなされた学術的な新発見と、本プロジェクト事後評価報告書において、将来の革新技術への応用につながるとされた成果を中心に波及事例と展望を述べる。

3.1.1 科学技術への波及事例

本プロジェクトにおける学術的な新発見は、電流による磁壁移動を観測したことである。図3-1は電流パルス印加後、一つの磁区の磁化が反転していることを示している。これは、観察可能な磁区が形成され、しかも小さな電流でその磁化が反転する強磁性半導体の特性を生かして得た結果であるが、材料のキュリー温度が低く、低温での現象である。しかし、このような研究がきっかけとなって、金属磁性体でも電流による磁化反転が確認され、同領域の研究が大きな広がりを見せている。例えば、プロジェクト終了後の発表論文の被引用回数ランキングNo.2の論文(表2-3)の発表後、すぐに世界で追実験が行われ、DRAM(Dynamic Random Access Memory)の代替技術として検討されるようになった¹¹。

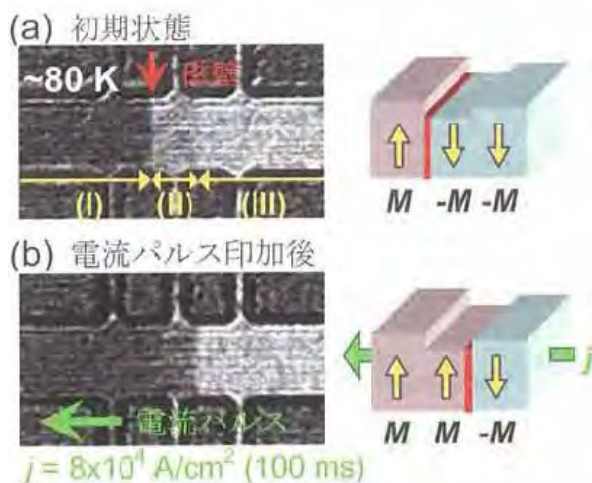


図3-1 電流パルス印加による磁化反転

(出典：大野半導体スピントロニクスプロジェクト研究終了報告書)

11 応用物理 第81巻 第7号 (2012)p589-p592 “半導体と磁性体に橋を架ける”

また、この成果に触発されて、キュリー温度が常温以上の強磁性半導体の探索が研究分野として活性化し、プロジェクトメンバー以外の研究グループからも多くの論文等が発表されている。

非磁性半導体の研究については、将来の革新技術として期待されている量子情報処理技術への応用につながる重要な成果を本プロジェクトにおいてあげた¹²。具体的には、次のような科学技術への波及に関連するデータがある。非磁性半導体の研究における量子もつれ光子に関する論文が、プロジェクト期間内の成果論文の被引用回数ランキング No. 5 に入っており(表 2-2)、2012 年 10 月 23 日までの被引用件数は 106 件となっている。また、2012 年にも GaAs 量子ドットから生成されるもつれ光子に関する論文が発表されており、既に 2 件の被引用がある。

3.1.2 科学技術への波及のまとめ

科学技術への波及として前項で技術的な発見について述べたが、別の視点からの波及として大野英男のリーダーシップを挙げることができる。大野が創出した研究分野が世界的な広がりをもって拡大しており、大野の論文は多数引用されている。また、当分野におけるリーダーシップがトムソン・ロイター引用栄誉賞という形でも裏付けられている。

また、若手の人材育成の成果として、プロジェクトメンバーが多くの競争的研究資金を獲得している。

3.1.3 今後の展望

本プロジェクトの後継となる新規プロジェクトについては既に述べたが、東北大学においても本プロジェクトのテーマが受け継がれ研究活動が続く。東北大学の¹²大野英男研究室の現在(2013 年 2 月 1 日)のテーマは次のとおりである。

<大野英男研究室>

(1) 半導体スピントロニクス(大野英男研究室)

強磁性半導体

強磁性半導体電界効果トランジスタ

スピン注入磁化反転

磁壁抵抗と電流磁壁移動

半導体へのスピン注入

核スピン偏極とコヒーレントコントロール

(2) 量子カスケードレーザ(大野英男研究室)

(3) 金属磁性体素子とそのメモリに関する研究(池田准教授研)

<大野英男研究室と東北大学電気通信研究所との共同プロジェクト>

(1) Nanoscience and Nanoelectronics

(2) 強磁性半導体によるスピントロニクスデバイスの開発

(3) 非磁性半導体中の電子や核の量子力学的スピンコヒーレンスの応用を目指して

(4) 不揮発性ロジックメモリ回路による高速で低消費電力の集積回路を目指して

12 ERATO 大野半導体スピントロニクスプロジェクト事後評価報告書

3.2 社会経済への波及と展望

本プロジェクトの成果の社会経済への波及についての客観的事例は、現時点では多くない。ここでは科学技術への波及事例で述べた「電流による磁化反転」のテーマを取り上げ、社会経済への波及に関する見通しを中心に述べる。

前述のようにプロジェクトメンバーの最近の論文のほとんどは、半導体メモリデバイス及び、半導体メモリデバイス形成技術に関するものになっている。プロジェクト期間中は基礎研究とデバイスへの応用研究とのバランスは、同程度あるいはどちらかというと基礎研究の比重が大きい状況にあった。しかしプロジェクト終了後は、論文の数で見ると応用研究の比率が増している。応用研究の主なテーマは、電流により磁化を制御するという新しい概念を実際にエレクトロニクス分野で使われるデバイスに展開することである。

第二次大戦後にトランジスタが発明されて以来、情報通信を中心としたエレクトロニクスが飛躍的な発展を遂げ、その原動力となったのが半導体集積回路の進化であった。半導体集積回路は構造の微細化に伴って関連技術がそれに追従し、現在まで高集積化、高性能化を継続している。しかし、これまでの微細化という路線での進歩は、ほとんどその限界に近づいている。一方では、情報通信機器が扱う情報量は増加を続け、このままではそのような大量のデータを扱う半導体集積回路の巨大な消費電力をまかなうことができなくなると予想されている。

しかし、スピントロニクスの応用で次世代不揮発性メモリが実現すれば半導体集積回路のアーキテクチャは図 3-2 のように、従来のものとはまったく異なったものになると考えられる。すなわち現状の集積回路では、ロジック回路とメモリ間の信号伝送における信号処理時間と消費電力で大きな無駄をかかえているが、新アーキテクチャではロジック回路の必要箇所に自由に不揮発メモリを配置することで、このような時間的遅延と消費電力を大幅に削減できる。また DRAM を不揮発メモリで置き換えることで DRAM のリフレッシュに必要な電力も不要となる。

ネット検索システムに代表されるようなデータセンターの消費電力は今後も増大を続けると予想され、スピントロニクスを用いた新しい集積回路の実現による、省エネ効果の社会経済への波及は極めて大きいと考えられている⁴¹⁾。

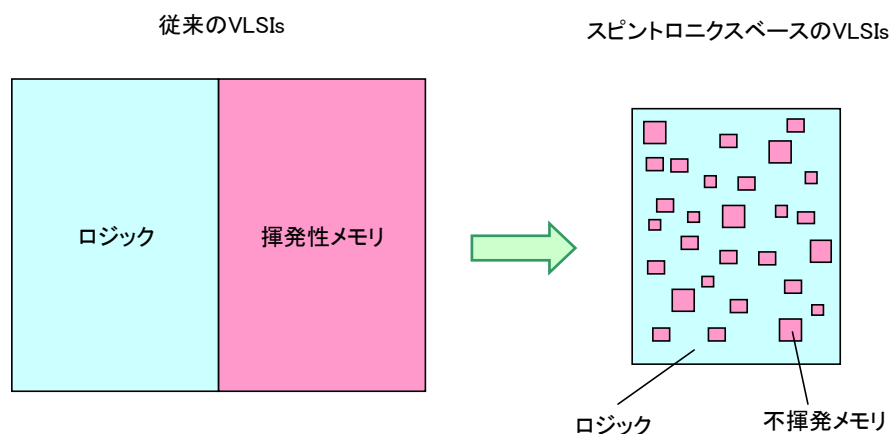


図 3-2 スピントロニクス集積回路のアーキテクチャ

(出典：東北大学 省エネルギー・スピントロニクス集積化システムセンターホームページ¹³を参考に作成)

13 <http://www.csis.tohoku.ac.jp/japanese/index.html>

3.2.1 社会経済への波及事例

社会経済への波及効果は、前記のような新しい集積回路が実現された時点で発生するものであるが、現時点における波及の事例としてこのような新デバイス実現のためのプロジェクトが活動を開始していることがある。その例として、「省エネルギー・スピントロニクス論理集積回路の研究開発」を挙げることができる。同プロジェクトにおいて大野英男は、新しい技術は皆に使われなければ本当の技術ではないという考えのもとに世界の流れをつくり日本を中心に世界がまわる状況を創出するという構想をかかげている。具体的には、単なる材料、素子、回路の開発ではなく、他の追随を許さないスピントロニクス論理集積回路の基盤技術体系(研究開発、製造、回路設計までが統合された体系)の構築を目標としている。

同プロジェクトの予算は、総額 34 億円である。

3.2.2 社会経済への波及のまとめ

1980 年代から 1990 年代の半ばにかけて、日本の半導体メーカーは、得意のすり合わせ技術を駆使して、世界のトップレベルにランキングされる状況にあった。その後は、徐々に厳しい状況となり現在に至っているが、最盛期にあってさえ日本の半導体集積回路技術が世界の標準になっている状況ではなかった⁴²⁾。

大野英男はスピントロニクス論理集積回路の基盤技術体系において、日本が世界の中心的地位を確立することを目標に、新たなプロジェクト活動及び大学での研究活動を進めている。

3.2.3 今後の展望

データセンターを始めとする消費電力の問題は深刻で、新材料によるパワーデバイスや光集積回路による省エネなど様々な対策が検討され、大型プロジェクトが並行して進められている。次世代メモリについても、スピントロニクスを用いたもの以外に様々な方式が考案され、方式間での研究開発競争も見られる⁴¹⁾。

スピントロニクスを用いたデバイスは、これまで電流だけで動作を制御していた半導体において、従来の電荷の自由度に加えて磁性・スピンの自由度を活用する点で独創的な概念に基づいており、スピントルクによる磁化反転と電界効果による磁化スイッチングの方式について基礎研究が進展している¹⁴⁾。スピントロニクスを応用する次世代メモリでは書き換え回数はほぼ無限であり、微細化するほど書き換えに要する電力を小さくできるという、磁気を用いるメリットを活用するとともに、電気によって駆動する点において従来の半導体との互換性が確保される。実際、STT-MRAM (spin transfer torque MRAM) と呼ばれるデバイスが、日本を始めとして、米国、韓国などで開発され、現在サンプル供給のステージに至っている⁴³⁾。

電流あるいは電圧による磁化の制御という、まったく新規な概念を用いるスピントロニクスデバイスは、社会全体が直面している情報電子機器の消費電力の増大という課題に対応するための様々な選択肢の一つと位置付けられ、実用化への道を歩んでいる。

14 応用物理 第 81 巻 第 7 号 (2012) p589-p592 “半導体と磁性体に橋を架ける”

引用文献

- 1) Yamanouchi M., Chiba D., Matsukura F., Ohno H., "Current_induced domain_wall switching in a ferromagnetic semiconductor structure" *Nature*, 2004, 428(6982)
- 2) Yamanouchi M., Chiba D., Matsukura F., Dietl T., Ohno H., "Velocity of domain_wall motion induced by electrical current in the ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As" *Physical Review Letters*, 2006, 96(9)
- 3) Yamanouchi M., Ieda J., Matsukura F., Barnes S.E., Maekawa S., Ohno H., "Universality classes for domain wall motion in the ferromagnetic semiconductor (Ga,Mn)As" *Science*, 2007, 317(5845)
- 4) Chiba D., Yamanouchi M., Matsukura F., Dietl T., Ohno H., "Domain_wall resistance in ferromagnetic (Ga,Mn)As" *Physical Review Letters*, 2006, 96(9)
- 5) Chiba D., Yamanouchi H., Matsukura F., Ohno H., "Electrical manipulation of magnetization reversal in a ferromagnetic semiconductor" *Science*, 2003, 301(5635)
- 6) Chiba D., Yamanouchi M., Matsukura F., Ohno H., "Control of magnetization reversal in ferromagnetic semiconductors by electrical means" *Journal of Physics Condensed Matter*, 2004, 16(48)
- 7) Nishitani Y., Chiba D., Matsukura F., and Ohno H., "Electrical Curie temperature modulation in (Ga,Mn)As field-effect transistors with Mn composition from 0.027 to 0.200," *Journal of Applied Physics*, to be published.
- 8) Chiba D., Sato Y., Kita T., Matsukura F., Ohno H., "Current_driven magnetization reversal in a ferromagnetic semiconductor (Ga, Mn)As/GaAs/(Ga, Mn)As tunnel junction" *Physical Review Letters*, 2004, 93(21)
- 9) Wang K.-Y., Sawrcki M., Edmonds K.W., Champion R.P., Maat S., Foxon C.T., Gallagher B.L., and Dietl T., "Single-domain behavior and the reorientation transition in (Ga,Mn)As," *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95(217204).
- 10) Sawicki M., Wang K.-Y., Edmonds K.W., Champion R.P., Staddon C.R., Farley N.R.S., Foxon C.T., Papis E., Kaminska E., Piotrowska A., Dietl T., Gallagher B.L., "In-plane uniaxial anisotropy rotations in (Ga,Mn)As thin films" *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2005, 71(12)
- 11) Sawicki M., Matsukura F., Idziaszek A., Dietl T., Schott G.M., Ruester C., Gould C., Karczewski G., Schmidt G., Molenkamp L.W., "Temperature dependent magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As layers" *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2004, 70(24)
- 12) Kechrakos D., Papanikolaou N., Trohidou K.N., Dietl T., "Monte Carlo simulations of ferromagnetism in p-Cd1-xMn xTe quantum wells" *Physical Review Letters*, 2005, 94(12)
- 13) Sliwa C., Dietl T., "Magnitude and crystalline anisotropy of hole magnetization in (Ga,Mn)As" *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 2006, 74(24)
- 14) Hankiewicz E.M., Jungwirth T., Dietl T., Timm C., Sinova J., "Optical properties of metallic (III, Mn)V ferromagnetic semiconductors in the infrared to visible

- range"Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics 2004, 70(24)
- 15) Sanada H., Matsuzaka S., Morita K., Hu C.Y., Ohno Y., Ohno H., "Hysteretic dynamic nuclear polarization in GaAs/Al_xGa_{1-x}As (110) quantum wells"Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 2003, 68(24)
 - 16) Sanada H., Matsuzaka S., Morita K., Hu C.Y., Ohno Y., Ohno H., "Gate control of dynamic nuclear polarization in GaAs quantum wells" Physical Review Letters, 2005, 94(9)
 - 17) Sanada H., Kondo Y., Matsuzaka S., Morita K., Hu C.Y., Ohno Y., Ohno H., "Optical pump-probe measurements of local nuclear spin coherence in semiconductor quantum wells"Physical Review Letters, 2006, 96(6)
 - 18) Morita K., Sanada H., Matsuzaka S., Hu C.Y., Ohno Y., Ohno H., "Strong anisotropic spin dynamics in narrow n-InGaAs/AlGaAs (110) quantum wells"Applied Physics Letters, 2005, 87(17)
 - 19) Morita K., Sanada H., Matsuzaka S., Hu C.Y., Ohno Y., Ohno H., "Electron spin dynamics in InGaAs quantum wells"Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2004, 21(2-4)
 - 20) Hu C.Y., Morita K., Sanada H., Matsuzaka S., Ohno Y., Ohno H., "Spin precession of holes in wurtzite GaN studied using the time-resolved Kerr rotation technique"Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics, 2005, 72(12)
 - 21) Kita T., Chiba D., Ohno Y., Ohno H., "(In, Ga)As gated-vertical quantum dot with an Al₂O₃ insulator"Applied Physics Letters, 2007, 90(6)
 - 22) Kita T., Chiba D., Ohno Y., Ohno H., "A few-electron vertical In_{0.56}Ga_{0.44}As quantum dot with an insulating gate"Applied Physics Letters, 2007, 91(23)
 - 23) Kohda M., Ohno Y., Matsukura F., Ohno H., "Effect of n⁺-GaAs thickness and doping density on spin injection of GaMnAs/n⁺-GaAs Esaki tunnel junction"Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2006, 32(1-2SPEC. ISS.)
 - 24) Kohda M., Kita T., Ohno Y., Matsukura F., Ohno H., "Bias voltage dependence of the electron spin injection studied in a three-terminal device based on a (Ga, Mn) As/ n⁺-GaAs Esaki diode"Applied Physics Letters, 2006, 89(1)
 - 25) Kita T., Kohda M., Ohno Y., Matsukura F., Ohno H., "Spin injection with three terminal device based on (Ga, Mn)As/n⁺ GaAs-tunnel junction"Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics, 2006, 3(12)
 - 26) Edamatsu K., Oohata G., Shimizu R., Itoh T., "Generation of ultraviolet entangled photons in a semiconductor" Nature, 2004, 431(7005)
 - 27) Kutsuwa T., Aral K., Shigyo H., Kinjo H., Ono K., Mitsumori Y., Kosaka H., and Edamatsu K., "Single photon response in GaAs quantum transport devices for photon-spin quantum state transfer" Phys. Stat. Sol., 2006, (c)3, (4326)
 - 28) Wrobel J., Dietl T., Lusakowski A., Grabecki G., Frone K., Hey R., Ploog K.H., Shtrikman H., "Spin filtering in a hybrid ferromagnetic-semiconductor microstructure"Physical Review Letters, 2004, 93(24)

- 29) Chiba D., Nishitani Y., Matsukura F., Ohno H., "Properties of Ga_{1-x}Mn_xAs with high Mn composition (x>0.1)" *Applied Physics Letters*, 2007, 90(12)
- 30) Lee H._J., Chiba D., Matsukura F., Ohno H., "Effect of substrate temperature on the properties of heavily Mn_doped GaAs" *Journal of Crystal Growth*, 2007, 301_302 (SPEC. ISS.)
- 31) Matsukura F., Sawicki M., Dietl T., Chiba D., Ohno H., "Magnetotransport properties of metallic (Ga,Mn)As films with compressive and tensile strain" *Physica E: Low_Dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, 21(2_4)
- 32) Yamada T., Chiba D., Matsukura F., Yakata S., Ohno H., "Magnetic anisotropy in (Ga,Mn)As probed by magnetotransport measurements" *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, 2006, 3(12)
- 33) Kaminska E., Przewdziecka E., Piotrowska A., Kossut J., Boguslawski P., Pasternak I., Jakiela R., Dynowska E., "Properties of p-type ZnO grown by oxidation of Zn-group-V compounds" *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2007, 957()
- 34) Sawicki M., Wang K.Y., Edmonds K.W., Champion R.P., Rushforth A.W., Foxon C.T., Gallagher B.L., Dietl T., "Coercivity enlargement in (Ga,Mn)As thin films with small amount of MnAs nanoclusters" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2007, 310(2SUPPL. PART3)
- 35) Dietl T., Andrearczyk T., Lipinska A., Kiecana M., Tay M., Wu Y., "Origin of ferromagnetism in Zn_{1-x}CoxO from magnetization and spin-dependent magnetoresistance measurements" *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 2007, 76(15)
- 36) Zhao J.H., Matsukura F., Takamura K., Chiba D., Ohno Y., Ohtani K., and Ohno H., "Zincblende CrSb/GaAs multilayer structures with room-temperature ferromagnetism," *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2003, 6, (507)
- 37) Endo M. Chiba D. Shimotani H. Matsukura F. Iwasa Y. Ohno H. "Electric double layer transistor with a (Ga,Mn)As channel" *Applied Physics Letters*, 2010, 96(2)
- 38) Ghali M. Ohtani K. Ohno Y. Ohno H. "Vertical_electrical_field_induced control of the exciton fine structure splitting in GaAs island quantum dots for the generation of polarization_ entangled photons" *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(6PART2)
- 39) Fukami, T. Suzuki, T. Nakatani, Y. Ishiwata, N. Yamanouchi, M. Ikeda, S. Kasai, N. Ohno H. "Current-induced domain wall motion in perpendicularly magnetized CoFeB" *Applied Physics Letters* 2011, 98
- 40) Kanai, S. Yamanouchi, M. Ikeda, S. Nakatani, Y. Matsukura, F. Ohno H. "Electric field-induced magnetization reversal in a perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction" *Applied Physics Letters* 2012, 101
- 41) 日経エレクトロニクス 2012 10-1 p.26 データセンター協奏曲
- 42) Planarization; CMP & Its Applications vol0 2006 p.1-p.19 "日本半導体産業のプロセス技術力とその問題点"
- 43) 日経エレクトロニクス 2013 1-21 p.19 最高峰の半導体学会に見た寡占化とモバイルの大潮流