

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 実績報告書

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	スピントロニクス技術を用いた超省電力不揮発性トランジスタ技術の開拓
研究機関・ 部局・職名	独立行政法人産業技術総合研究所・ナノスピントロニクス研究センター・研究チーム長
氏名	齋藤 秀和

1. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

2. 収支の状況

(単位:円)

	交付決定額	交付を受けた額	利息等収入額	収入額合計	執行額	未執行額	既返還額
直接経費	126,000,000	126,000,000		126,000,000	126,000,000	0	0
間接経費	37,800,000	37,800,000		37,800,000	37,800,000	0	0
合計	163,800,000	163,800,000	0	163,800,000	163,800,000	0	0

3. 執行額内訳

(単位:円)

費目	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	合計
物品費	100,000	81,417,293	9,697,053	12,769,031	103,983,377
旅費		1,210,150	2,310,802	1,155,940	4,676,892
謝金・人件費等		6,336,252	4,799,183	0	11,135,435
その他		1,548,687	2,248,502	2,407,107	6,204,296
直接経費計	100,000	90,512,382	19,055,540	16,332,078	126,000,000
間接経費計	30,000	27,990,000	4,890,000	4,890,000	37,800,000
合計	130,000	118,502,382	23,945,540	21,222,078	163,800,000

4. 主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関名
精密手動スクライパー	ムサンノ電子株式会社	1	997,500	997,500	2011/6/28	産業技術総合研究所
ベリリウム塊	アサヒメタル商事株式会社	1	907,200	907,200	2011/9/8	産業技術総合研究所
四重極型質量分析計	株式会社アールデック	1	1,243,200	1,243,200	2011/11/22	産業技術総合研究所
アルカリ金属エバポレータ	株式会社アールデック	1	997,500	997,500	2011/11/28	産業技術総合研究所
III-V族半導体成長用分子線エピタキシー装置	株式会社エイコー	1	58,800,000	58,800,000	2011/12/26	産業技術総合研究所
III-V族半導体成長用分子線エピタキシー装置改造	株式会社エイコー	1	2,947,350	2,947,350	2011/12/26	産業技術総合研究所
光学特性測定用超伝導マグネット	オックスフォード・インストルメン	1	12,761,700	12,761,700	2012/1/10	産業技術総合研究所
高性能データレコーダー	株式会社キーエンス	1	577,500	577,500	2012/3/13	産業技術総合研究所
電子スピン検出用分光システム	ルシール社製	1	4,410,000	4,410,000	2012/11/5	産業技術総合研究所
III-V族半導体成膜装置用分子線源	エイコー社製	1	3,969,000	3,969,000	2012/12/25	産業技術総合研究所
電子スピン検出用除振台ユニット	明立精機株式会社	1	1,452,938	1,452,938	2013/10/18	産業技術総合研究所
半導体(ゲルマニウムonシリコン)単結晶ウエハ	有限会社デンザイ	1	651,000	651,000	2013/10/8	産業技術総合研究所
AVC社製アルカリ金属エバポレータ	AVC	1	558,600	558,600	2014/2/19	産業技術総合研究所
低温磁場中物理特性評価装置	株式会社バスケル	1	7,854,000	7,854,000	2014/3/20	産業技術総合研究所

5. 研究成果の概要

鉄と極薄酸化マグネシウム層(厚さ2 ナノメートル)から成る単結晶強磁性トンネル接合を用いることにより、世界で初めて次世代半導体材料のp型ゲルマニウムの中へ、室温で磁性体のスピン情報を入力することに成功しました。室温でのp型ゲルマニウム中のスピン拡散長を見積ったところ、理論的な予想値より桁長く、スピントランジスタへの応用に必要な長さ(50ナノメートル程度)より十分に長い80ナノメートル以上あることが判明しました。本成果は、超省電力動作が期待されているスピントランジスタの実現に繋がるものであり、将来のグリーンITの発展に大きく貢献できると期待されます。

課題番号	GR099
------	-------

## 先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム) 研究成果報告書

本様式の内容は一般に公表されます
------------------

研究課題名 (下段英語表記)	スピントロニクス技術を用いた超省電力不揮発性トランジスタ技術の開拓
	Development of nonvolatile transistor with ultra-low power consumption by using spintronics technology
研究機関・部局・ 職名 (下段英語表記)	独立行政法人産業技術総合研究所・ナノスピントロニクス研究センター 半導体スピントロニクスチーム・研究チーム長
	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Spintronics Research Center, Semiconductor Spintronics Team, Team Leader.
氏名 (下段英語表記)	齋藤 秀和
	Hidekazu Saito

### 研究成果の概要

(和文):近年、コンピュータに代表されるハイテク IT 機器の消費電力の増大が深刻な問題となっています。本研究により世界で初めて次世代半導体材料の p 型ゲルマニウムの中へ、室温で磁性体のスピン情報を入力することに成功すると共に、電流を用いない新たなスピン情報の入力手法の開発に成功しました。本研究によりスピンを利用した不揮発性トランジスタの実現が見込まれ、将来的には待機電力がほぼ零である「ノーマリー・オフ・コンピュータ」に繋がるのが期待されます。

(英文):In recent years, the volume of high-tech IT equipment (for example, computers) being shipped has grown rapidly, and the increase in power consumption accompanying that rapid growth has become a serious problem. In this project, we have successfully achieved input of spin information from magnetic material into a p-type germanium at room temperature and developed a novel technology for the input of spin information without an electric current. The present research demonstrates the possibility of creating a nonvolatile transistor utilizing electron spin. It is expected that this transistor will lead to creation of a “normally off computer”— namely, a

computer whose standby power requirement is just about zero—sometime in the future.

1. 執行金額 163,800,000 円

(うち、直接経費 126,000,000 円、 間接経費 37,800,000 円)

2. 研究実施期間 平成23年2月10日～平成26年3月31日

3. 研究目的

近年、コンピュータ等の IT 機器が消費するエネルギーはその急速な普及に伴って急激に増大しており、主要な温室効果ガスの排出源の一つに数えられるに至っている。このため、IT 機器の省電力化は将来の高度情報化社会と低炭素社会を両立するための緊急課題である。IT 機器が消費する電力の中でも待機電力が大部分を占めており、省電力化のためにはその削減が必要不可欠である。これは、現在のコンピュータの主要半導体メモリが電源を切ると情報が失われてしまう「揮発性」メモリで構成されていることから、たとえ機器を使用していない間でも電源を切ることができないためである。そのため、電源を切っても情報が失われない「不揮発性」メモリデバイスで既存メモリを置き換えることができれば消費電力の大幅な抑制が可能となるはずである。

このような背景より、電子の電荷とスピン自由度を半導体単一素子中で利用して不揮発機能を達成するスピントランジスタが、将来の半導体メモリ開発の指針となる ITRS ロードマップにも記載されるなど世界的に注目されている。しかしながら、これまでスピンに依存したトランジスタ動作を明確に実証した例はない。この大きな要因は、その動作原理の根幹を成す、一方の強磁性電極より半導体伝導帯中へスピン偏極電子を注入(スピン注入)し、もう一方の強磁性電極でスピン情報を検出(スピン検出)する技術が確立されていないためである。

以上を踏まえ、本提案はスピントランジスタの基盤技術である IV 族半導体への室温でのスピン注入・検出技術の確立を目的とする。申請者のこれまでの研究により、高品位の強磁性電極/半導体接合を実現することが目標達成のための最重要技術であることが分かっている。本研究では申請者が有する異種材料間ヘテロ接合膜技術を駆使し、半導体上の高品位強磁性トンネル接合を実現した上で室温でのスピン注入・検出の実証に挑む。

4. 研究計画・方法

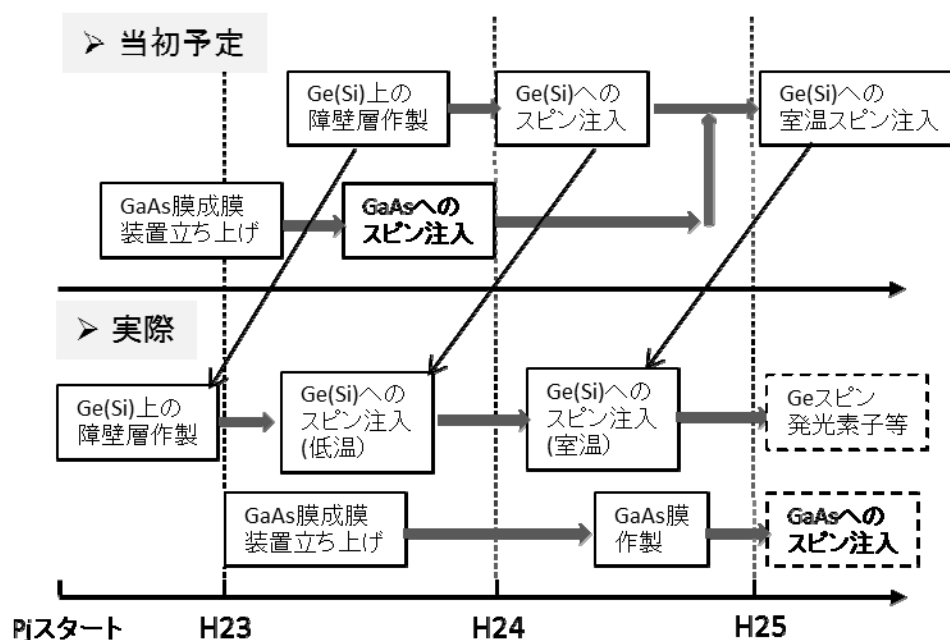
本プロジェクトの主な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 次世代半導体ゲルマニウム(Ge)へのスピン注入の実現
- (2) シリコン(Si)上の単結晶スピン注入源の開発と新奇スピン注入法の開発
- (3) 砒素化ガリウム(GaAs)基スピン依存発光素子開発

本研究で用いるスピン注入・検出実験手法は二種類に大別される。一つは伝導特性のみで評

価する方法ある。最終的にはトランジスタのソース/ドレインに対応した2つの強磁性金属電極間での(局所配置)スピン依存効果を観測する必要があるが、本質的なスピン依存効果とその他の寄生効果との分離が困難であることから、研究初期の段階で用いる素子としては相応しくない。また、強磁性トンネル接合そのものの評価を行うことが困難である。そこで、2つの強磁性電極を用いる局所配置による測定に先立ち、単一強磁性電極を用いる手法(3端子配置)での測定を行う。同手法はスピン注入・検出のプロトタイプ素子として広く用いられている。もう一つは光を用いる方法である。GaAsに代表される直接遷移型半導体(SiおよびGeは間接遷移型半導体)に強磁性体からスピン偏極電子が注入された場合、光学的選択側に従って発光は円偏光となる。この光の偏極率を測定することにより注入電子のスピン偏極率を直接求めることが出来る。この方法は理論モデルを用いることなく直接的に電子のスピン偏極率を得る利点があるため、GaAs系半導体に関しては強力な測定手法として確立している。以上の特徴を踏まえ、本研究では、SiおよびGeでは3端子配置、GaAsでは発光素子を用いて実験を行う。

なお、研究計画書作成当初は、従来から取り組んできた GaAs 基半導体を研究期間の前半に実施し、その後、IV 族半導体へのスピン注入に移行する予定であった。しかし、本プロジェクト提案後、IV 族半導体をベースとしたスピントロニクス技術が非常に注目を集めるようになってきた。この状況を踏まえて、トランジスタ応用のための最重要半導体である IV 族半導体へできるだけ早急に移行すべきと判断し、III-V 族に優先して研究に取り組んだ。

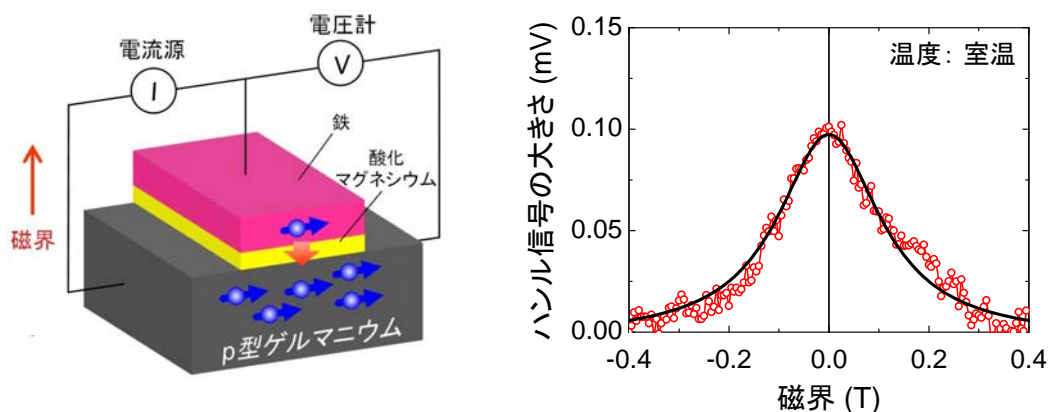


## 5. 研究成果・波及効果

本プロジェクトにて得られた主な成果を以下に記す。

(1) 次世代半導体 Ge へのスピン注入に世界で初めて成功

p 型 Ge は現行の半導体材料であるシリコンの数倍ものキャリア移動度を有することから、より高速動作可能な次世代トランジスタのチャンネル層材料として注目されている。したがって、p 型 Ge に磁性体からのスピン情報を効率良く入力することができれば、グリーン IT 化に向けての大きな推進力となることが期待される。しかし、理論的に Ge のホールのスピン緩和時間(スピン情報を失が失われるまでの時間)が極めて早いため、スピン信号の検出は困難であると予想されていた。しかし、我々は上記の理由により p 型 Ge へのスピン注入がどうしても必要という思いからその実証に挑んだ。我々は、これまでの研究で培った強磁性トンネル電極作製技術を駆使し、スピン入力用電極として鉄と酸化マグネシウム(約 2 ナノメートル)からなる高品位単結晶電極を作製したことより、室温までのスピン情報の入力に成功した。本成果は、スピントランジスタの実現のための重要なブレイクスルーとなり得るものであり、待機電力がほぼ零である「ノーマリー・オフ・コンピュータ」に繋がるのが期待できる。本成果に関連する研究内容は査読付き英文学術論文誌へ 4 件掲載されるとともに、新聞発表を行った。



左図:半導体ゲルマニウムへのスピン入力を観測するための素子の模式図。スピン入力のための電極は鉄と酸化マグネシウムから構成される。電極は鉄と酸化マグネシウムから構成される。鉄からゲルマニウムへ電流を流すことによって、ゲルマニウムに鉄のスピン情報が入力される。右図:素子電圧の外部磁場に対する応答。赤丸が実験データ、黒線はフィッティングカーブをそれぞれ示す。ゲルマニウム中に電子スピン情報が入力されたことを示すホール効果が確認された。

(2) Si 上の単結晶スピン注入源の作成と新奇スピン注入法の開発

Ge と同様に Si 上の Fe/MgO 完全単結晶トンネル接合の作製技術を開発し、p 型 Si への室温でのスピン注入に成功した。

一方で、よりデバイス駆動の省電力化を視野に入れ、電流を用いない新たなスピン注入技術の開発も進めた。既に Si スピントロニクスの世界的研究者である R. Jansen 氏との共同研究において、強磁性電極と Si 間に熱勾配を設けるだけで Si へスピンを注入する新現象「ゼーベック・スピントネリング」を見出していた。本プロジェクトにおいて、熱と同時に強磁性/Si 間に電界を印加することにより、ゼーベック・スピントネリング効果により誘起されたスピン信号強度を大きく変調することに成功した。この成果は排熱をも利用する新たなスピン注入手法として大きな反響を呼び、

世界で最も権威のある雑誌の一つである Nature Materials 誌に掲載された。

なお、GaAs 等の III-V 族半導体による発光素子の作製は、本プロジェクトにて購入した III-V 族半導体成膜装置のトラブルのため実験に遅延が生じ、H25 年度より半導体膜の作製を本格的に開始することができた。これまで、GaAs/AlGaAs 多重量子井戸の成膜条件およびそれを発光層に用いた発光素子の作製を行った。作製した素子の発光実験を行い、スピン偏極率測定に十分な光量が室温で得られることを確認した。また、無磁場中にてスピン偏極測定を行うために必要である垂直磁気異方性を有する強磁性電極の開発も並行して行った。具体的には Tb/Fe 多層膜を分子線エピタキシー法にて作製し、室温にて高品位の垂直磁化膜を得ることができた。

6. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 10 件</p>	<p>(掲載済み一査読有り) 計 8 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. S. Watanabe, H. Saito, Y. Mineno, S. Yuasa, and K. Ando, "Origin of very low effective barrier height in magnetic tunnel junctions with a semiconductor GaO<sub>x</sub> tunnel barrier", Japanese Journal of Applied Physics, <b>50</b>, (2011) 113002-1.</li> <li>2. H. Saito, S. Watanabe, Y. Mineno, S. Sharma, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Electrical creation of spin accumulation in p-type germanium", Solid State Communications <b>151</b>, (2011) 1159.</li> <li>3. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Spin accumulation in nondegenerate and heavily doped p-type germanium", Applied Physics Express <b>5</b>, (2012) 023003.</li> <li>4. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Spin Accumulation and Spin Lifetime in p-Type Germanium at Room Temperature", Applied Physics Express <b>5</b>, (2012) 053004.</li> <li>5. A. Spiesser, S. Watanabe, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Effective Creation of Spin Polarization in p-type Ge from a Fe/GeO<sub>2</sub> Tunnel Contact", Japanese Journal of Applied Physics <b>52</b>, (2013) 04CM01</li> <li>6. A. Spiesser, Y. Sato, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Epitaxial growth of ferromagnetic semiconductor GaMnAs film on Ge(001) substrate", Thin Solid Films <b>536</b>, 323 (2013).</li> <li>7. S. Sharma, A. Spiesser, S. P. Dash, S. Iba, S. Watanabe, B. J. van Wees, H. Saito, S. Yuasa, and R. Jansen, "Anomalous scaling of spin accumulation in ferromagnetic tunnel devices with silicon and germanium", Physical Review B <b>89</b>, 075301 (2014).</li> <li>8. K. R. Jeon, B. C. Min, A. Spiesser, H. Saito, S. C. Shin, S. Yuasa, and R. Jansen, "Voltage tuning of thermal spin current in ferromagnetic tunnel contacts to semiconductors", Nature Materials <b>13</b>, 360 (2014).</li> </ol> <p>(掲載済み一査読無し) 計 2 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. A. Spiesser, S. Sharma, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, "Electrical spin injection in p-type Si using Fe/MgO contacts", SPIE Proceedings <b>8461</b>, (2012).</li> <li>2. 齋藤秀和, "強磁性トンネル接合を用いた Ge への電氣的スピンの偏極電子生成", Magnetism Japan <b>8</b>, 237 (2013).</li> </ol> <p>(未掲載) 計 0 件</p>
<p>会議発表 計 19 件</p>	<p>専門家向け 計 18 件</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 齋藤秀和、渡辺 克、峰野 祐輔、R. Jansen、湯浅 新治、安藤 功兒、"Ge 中におけるスピンの蓄積の電氣的生成と検出"、応用物理学会学術講演会春季大会、平成 23 年 3 月 24 日～27 日、相模原市、神奈川県</li> <li>2. H. Saito, S. Watanabe, Y. Mineno, S. Sharma, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Electrical creation of spin accumulation in p-type Ge with an epitaxial Fe/MgO tunnel contact", 2011 55<sup>th</sup> Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Nov. 14-18, 2011, Atranta, USA.</li> <li>3. H. Saito, S. Watanabe, Y. Mineno, S. Sharma, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, "Electrical creation of spin accumulation in p-type Ge", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sep. 28-30, 2011, Nagoya, Japan.</li> <li>4. 齋藤秀和、渡邊克、揖場聡、S. Sandeep、R. Jansen、湯浅新治、安藤功兒、"半導体 Ge へのスピンの蓄積に及ぼすショットキー障壁の影響"、応用物理学会学術講演会秋季大会、2011 年 8 月 29 日-9 月 2 日、山形大学、山形市</li> <li>5. 揖場聡、齋藤秀和、A. Spiesser、渡邊克、湯浅新治、安藤功兒、"縮退および非縮退 p 型 Ge におけるスピンの蓄積"、応用物理学会春季大会、2012 年 3 月 15 日-18 日、早稲田大学、東京</li> <li>6. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, "Doping</li> </ol>



	<p>concentration dependence of spin accumulation in p-type germanium”, International conference on physics and application in spin-related phenomena in semiconductors, 2012, Aug. 5-8, Eindhoven, Netherlands.</p> <p>7. A. Spiesser, S. Sharma, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, “Electrical spin injection in p-type Si using Fe/MgO contacts”, SPIE Nanoscience Engineering 2012, Aug. 12-17, San Diego, USA.</p> <p>8. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, “Spin accumulation in nongenerate and heavily doped p-type germanium”, International conference of solid state devices and materials, 2012, Sep. 25-27, Kyoto, Japan.</p> <p>9. A. Spiesser, S. Watanabe, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando, “Effective Creation of Spin Polarization in p-type Ge from a Fe/GeO<sub>2</sub> Tunnel Contact”, International conference of solid state devices and materials, 2012, Sep. 25-27, Kyoto, Japan.</p> <p>10. 揖場聡、齋藤秀和、A. Spiesser、渡邊克、R. Jansen、湯浅新治、安藤功児、”p 型 Ge 中の室温におけるスピン蓄積とスピン寿命”、応用物理学会秋季学術講演会、2012 年 9 月 12-15 日、松山大学、松山</p> <p>11. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa and K. Ando, “Spin Accumulation and Spin Lifetime in p-Type Germanium at Room Temperature”, 12<sup>th</sup> Joint MMM/intermag conference, 2013, Jan. 14-18, Chicago, USA.</p> <p>12. (招待講演) H. Saito, ”Electrical spin injection into semiconductors”, Energy Materials Nanotechnology Fall meeting, 2013, Dec.7-10, Orlando, USA</p> <p>13. (招待講演) 齋藤秀和、”半導体スピントロニクス最前線”, 日本学術振興会将来加工技術第136委員会, 2013年5月10日, 東京</p> <p>14. S. Iba, H. Saito, A. Spiesser, S. Watanabe, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando, “Spin Accumulation and Spin Lifetime in p-Type Germanium at Room Temperature”, 応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16-20日, 京田辺市, 京都</p> <p>15. A. Spiesser, S. Sharma, H. Saito, S.Yuasa, K. Ando, B.J. van Wees, R. Jansen, ”Origin of Anisotropy of Spin Accumulation Induced by Tunneling in Si and Ge”, International Conference on Solid State devices and Materials, 2013, Sep.24-27, Fukuoka, Japan.</p> <p>16. Y. Sato, A. Spiesser, H. Saito, K. Ando, S. Yuasa and N. Miura, ”Epitaxial Growth of Ferromagnetic Semiconductor Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As Film on Ge(001) Substrate”, International Conference on Solid State devices and Materials, 2013, Sep.24-27, Fukuoka, Japan.</p> <p>17. A. Spiesser, H. Saito, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando”, Spin Accumulation induced in Ge using an Epitaxial Mn<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub> Schottky Contact”, Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2013, Nov.4-8, Denver, USA.</p> <p>18. H. Saito, Y. Sato, T. Takada, R. Jansen, S. Yuasa, and K. Ando,” Reduction of Schottky Barrier Height for Fe/n-type Ge Junction by Inserting a Thin GeO<sub>2</sub> Layer”, 応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月17-20日, 相模原市, 神奈川</p> <p>一般向け 計1件</p> <p>1. 齋藤秀和、”半導体スピントロニクス素子のためのトンネル障壁層の開発”、GCOE シンポジウム、2011 年 11 月 18 日、北海道大学、札幌市。</p>
<p>図書</p> <p>計0件</p>	
<p>産業財産権 出願・取得 状況</p> <p>計0件</p>	<p>(取得済み) 計0件</p> <p>(出願中) 計0件</p>

様式21

Webページ (URL)	
国民との科学・技術対話の実施状況	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. “磁石の不思議な世界～聞いて、さわって、体験しよう～”、平成 23 年 2 月 4 日、日本科学未来館(東京)、小学生対象、参加人数80名、磁石の性質や役割について講演や体験コーナーを通して理解を深める</li> <li>2. “磁石の不思議な世界～聞いて、さわって、体験しよう～”、平成 25 年 3 月 3 日、千葉大学(千葉)、小学生対象、参加人数80名、磁石の性質や役割について講演や体験コーナーを通して理解を深める</li> <li>3. “磁石の不思議な世界～聞いて、さわって、体験しよう～”、平成 26 年 3 月 9 日、日本大学(東京)、小学生対象、参加人数80名、磁石の性質や役割について講演や体験コーナーを通して理解を深める</li> </ol>
新聞・一般雑誌等掲載計 2 件	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 科学工業日報、2012年5月10日 5面、“室温でスピン情報入力”</li> <li>2. 日刊工業新聞、2012年5月16日 20面、“室温で磁性体のスピン情報、p型ゲルマニウムに入力”</li> </ol>
その他	

7. その他特記事項