

## 半導体ナノスピントロニクス

浜屋, 宏平  
九州大学大学院システム情報科学研究所

<https://doi.org/10.15017/24685>

---

出版情報：九州大学低温センターだより. 5, pp.2-7, 2011-03. 九州大学低温センター  
バージョン：  
権利関係：

# 半導体ナノスピントロニクス

浜屋宏平

大学院システム情報科学研究所 情報エレクトロニクス部門

## 1. はじめに

今日のデジタル家電や携帯端末等の情報通信機器に代表される電子機器の殆どは、半導体素子の高性能化によって飛躍的な発展を遂げてきた。CMOS と呼ばれる半導体スイッチング素子を基礎とした種々のシステム LSI がその発展の中枢を担ってきた。しかし近年、その集積化や高速動作化に伴う消費電力の増大が問題となっている。また、半導体素子にとって致命的な点は揮発性(電源を切ると情報を失う)であり、素子を使用しない時でも電源をオンのままで待機する必要があることである。これが、電子機器における待機電力増大の要因であり、全体の消費電力の約 30%以上を占めていると言われている。さらに、今日のシリコン(Si)LSI 技術は、国際半導体技術ロードマップに記載されているスケーリング則(ムーアの法則：微細化=素子性能の向上)の物理的な限界に直面しつつあり、それを打破する新技術を開発しなければ、我が国の産業を大きく発展させてきた半導体産業が高度情報化ユビキタス社会実現の要求に応えられなくなってしまう。

このような背景から、資源やエネルギーに乏しい我が国においては、高度情報化社会における中心を担う新しい超低消費電力(不揮発性・高性能)電子デバイスの実現が望まれている。



図1. 電子の持つ2つの自由度.

## 2. スピントロニクスとは?

スピントロニクスは、電子が持っている『電気を流す性質』と『磁石になる性質』の2つの性質を利用し、まったく新しい機能材料や電子デバイスを開発する研究分野のことで、スピンエレクトロニクスとも言われている<sup>1)</sup>。現代社会を支えている半導体エレクトロニクスでは、Si や GaAs 中の電子の『電荷自由度( $e$ )』の有無を利用している。一方、電子は自転の向きにより上向きと下向きの『スピン自由度  $S$  ( $\uparrow$  or  $\downarrow$ )』を持っており(図1)、この『スピン』が電子の磁石の根源である。電子が微小な磁石である性質を利用し、

ハードディスクのような磁気記録媒体と同様に磁性体デバイスを不揮発性メモリ(固体磁気メモリ:MRAM)として利用しようという研究が世界中で進められている(図2参照)<sup>2)\*</sup>。2007年のノーベル物理学賞は、このス

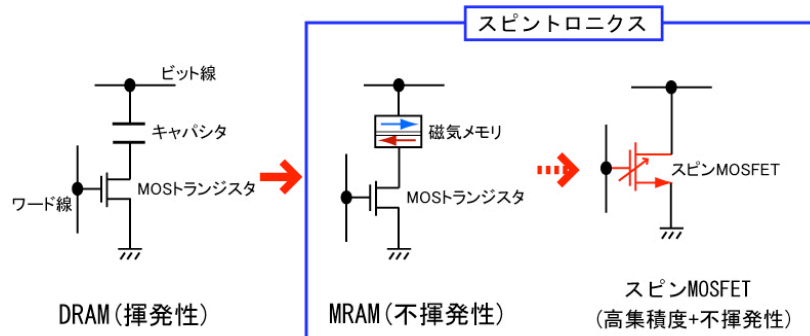


図2. スピントロニクス素子の次世代不揮発メモリへの応用例.

\*MRAMの磁気メモリ部の磁性層反転技術には、スピントルク方式の導入が提案されている。

ピントロニクス研究の発端とも言える『巨大磁気抵抗(GMR)効果の発見』であることは記憶に新しい。この GMR 効果を利用したハードディスク装置の磁気ヘッド部の高性能化が、今日の記録密度の大容量化に大きく貢献していることは言うまでもない。

### 3. シリコンスピン MOSFET の開発

図2中央のMRAMは、半導体素子(MOSトランジスタ)と磁気メモリ素子を組み合わせた構造となっている。現状のDRAM(図2左)を置き換える汎用不揮発メモリ素子として期待されているが、高集積化の観点で課題を残している。また、主に強磁性金属から構成される磁気メモリ素子をシリコン(Si)ベースの半導体素子に混載するには、素子作製プロセス面でもブレークスルーが必要である。

そこで注目を浴びているのが、半導体スピントロニクス素子の代表格である Si スピン MOSFET(図3)である<sup>3)</sup>。このスピン MOSFET は、ソース・ドレイン電極が強磁性体から成り、トランジスタの機能に加えて磁気メモリの機能も有していることから、図2右のように別途のメモリセルが不要であるため、究極の不揮発メモリ素子として期待されている。しかし、このスピン MOSFET を動作させるためには、非磁性体である Si に強磁性体ソース電極からスピン偏極電子を『注入』し、Si チャンネル中を『輸送』し、強磁性ドレイン電極で電氣的に『検出』しなければならない。現在、アメリカ<sup>4)</sup>やオランダ<sup>5)</sup>の研究グループを筆頭に、個々の要素技術開発で競争が激化している。

我々は、上記のスピンMOSFETの実現を目指し、強磁性ソース・ドレイン電極として、高いスピン偏極率を有するホイスラー合金材料群に着目し、それを用いたSiへの高効率スピン注入技術进行研究している。低温分子線エピタキシー法を用いて、規則構造を有するホイスラー合金をSi基板上に高品質にエピタキシャル成長する技術を確立した<sup>6-8)</sup>。図4に我々の実現したホイスラー合金/Siヘテロ接合の例として、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$ <sup>6)</sup>および $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{Si}$ <sup>7)</sup>からなるヘテロ構造の断面電子顕微鏡(TEM)写真とその電子線回折像を示す。断面TEM像から、ホイスラー合金がSi基板上に原子層レベルでエピタキシャル成長していることが分かる。さらに挿入図の電子線回折像からは、規則度の高いホイスラー合金が形成されていることが証明された。つまり、作製されたホイスラー合金は、高いスピン偏極率を有していることが期待される。ごく最近、このホイスラー合金が高いスピン注入効率を有することが実証されている<sup>9)</sup>。

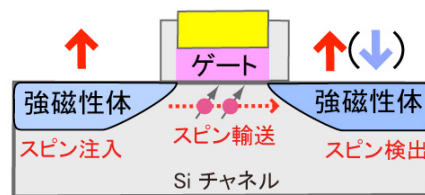


図3. スピン MOSFET<sup>3)</sup>の模式図.

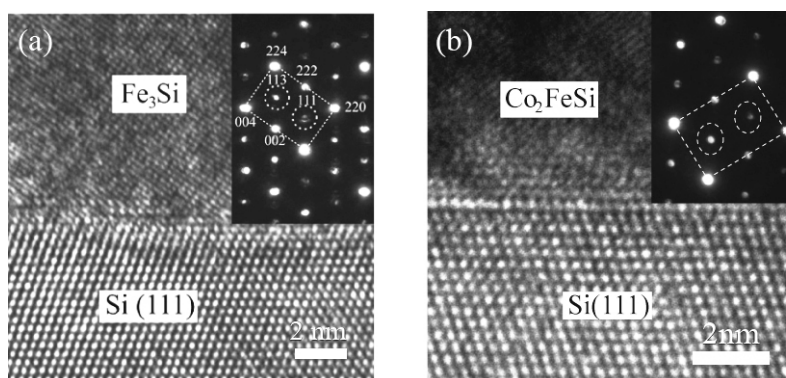


図4. ホイスラー合金/Si 高品質界面の TEM 像. (a)  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$  と (b)  $\text{Co}_2\text{FeSi}/\text{Si}$ .

この高品質界面を利用したトンネル型スピン注入を実現するために、 $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$  (基板不純物濃度 $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )の界面付近のみ高濃度層( $10^{19}\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ )を形成して電流-電圧特性を評価した。図5には、比較のために、この高濃度ドーブ層を含む界面(Diode A)と含まない界面(Diode B)の電気伝導評価の結果を示す。Diode Bは逆方向電流密度に対する順方向電流密度の比(ON/OFF比)が4桁以上と非常に大きく、明瞭なショットキー伝導特性が確認されている。また、逆方向電流密度( $I = -0.3 \text{ V}$ )の温度依存性[図5(b)]から、明瞭な熱電子放出理論でフィッティングされた(ショットキー障壁高さ $0.61 \text{ eV}$ )。つまり、電子はショットキー障壁を熱的に飛び越えて半導体中に注入されていることを示唆している。これに対してDiode Aでは、明瞭な逆方向電流の増大が観測されており、逆方向電流密度が順方向電流密度に匹敵している[図5(a)]。つまり、オーミック伝導が実現している。逆方向電流密度( $I = -0.3 \text{ V}$ )はほとんどの温度に依存せず図5(b)、良好なトンネル伝導を示唆している。

そこで我々は、このDiode Aのような良好なトンネル注入界面を有する横型スピン伝導素子[図6(a)]を作製し、4端子非局所電圧測定法<sup>10)</sup>を用いてスピン伝導の観測を試みた。図6(b)には、約 $180 \text{ K}$ で観測した非局所抵抗の磁場依存性を示す。明瞭なヒステリシス信号を観測し、その信号は電極2と3の磁化が反平行配置に近い状態の時に大きく変化している様子が確認された<sup>11)</sup>。これは、ショットキートンネル型の界面を介してSiへのスピン注入/検出に成功した初めての例である。現在、スピン伝導を観測する温度は低温( $\sim 180 \text{ K}$ )に限られており、さらなる高効率スピン注入技術の開発が望まれている。今後、ハーフメタル電極を用いたスピン注入技術を開発し、室温スピン伝導の観測を目指す。

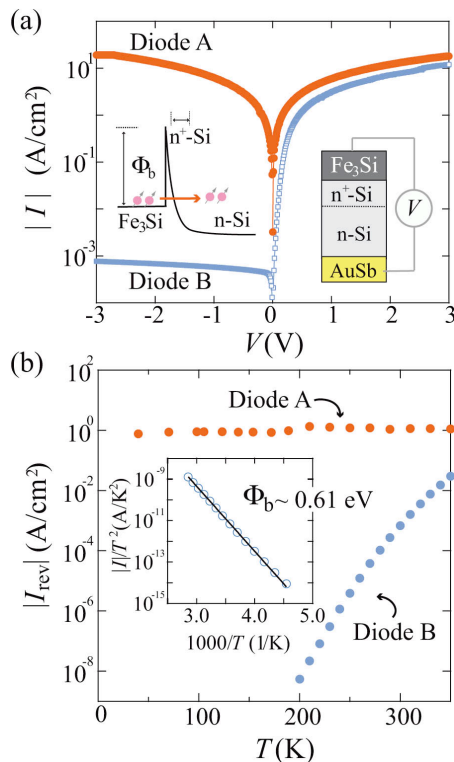


図 5. (a)  $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}$  ショットキーダイオードの電流-電圧特性。界面近傍に高濃度ドーブ層がある場合(Diode A)とない(Diode B)場合。(b) 各々の試料の逆バイアス電流の温度依存性。Diode Bは、熱電子放出理論式でフィッティングできる。

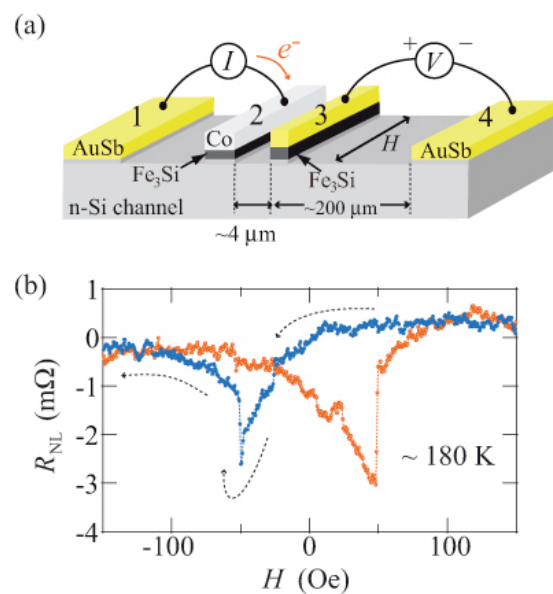


図 6. (a) 作製した横型スピン伝導素子の模式図。電極 2 と電極 3 の反転磁界に差をつけるために、電極 2 は  $\text{Co}/\text{Fe}_3\text{Si}$  からなる積層構造になっている。また、電極 1 と電極 2 はオーミックコンタクトである。(b) スピン信号の磁場依存性 ( $\sim 180 \text{ K}$ )。明瞭なヒステリシス曲線を示しており、スピン注入、輸送、検出の 3 つを実現している。

#### 4. 次々世代スピントロニクス素子 - 単電子スピントランジスタ -

半導体は結晶成長技術や微細加工技術により原子の持つド・ブロイ波長(数 nm~20 nm)程度のナノ構造を人工的に作製することができる。このナノ構造中では電子はその領域に閉じこめられ、電子の状態密度は離散化される。特に、3次元全ての方向から閉じ込めたものを『量子ドット』と呼ぶ。この量子ドット中に電子を注入するためにトンネル接合を介してソース・ドレイン電極を接合すると、大きな帯電効果により外部から一定のエネルギーが与えられるまで電荷移動が起こらないクーロン・ブロッケイド現象が観測される。これを応用した素子が単電子トランジスタ(図7)である。一方、半導体量子ドット中の電子は軌道を描き、本物の原子と似たエネルギー準位をとるため、パウリの排他原理やフントの法則などの量子力学の利用が可能となる。半導体量子ドットが『人工原子』と呼ばれる所以である<sup>11)</sup>。筆者は、この人工原子とスピントランジスタ構造を融合した究極のスピントロニクス素子『単電子スピントランジスタ』の実証を試みている<sup>12)</sup>。図8(a)に試作した単一電子スピントランジスタの模式図を、図8(b)に作製したナノ接合部の電子顕微鏡像を示す。半導体量子ドットである自己形成 InAs 量子ドットに、強磁性電極(Ni)が接合している。このような微小素子を 1 K 以下という極低温に冷却して電気伝導を測定する。図8(c)には、微分コンダクタンスのソース・ドレイン電圧( $V_{SD}$ )、ゲート電圧( $V_G$ )依存性を示す。いわゆるクーロンダイヤモンドが観測されている。つまり、強磁性電極を接合した図8(a)のような素子であっても、単電子トランジスタとして動作し得ることを示している。ここで、外部磁場を掃引することにより強磁性電極の磁化配置を平行 or 反平行と制御すると、強磁性体電極から量子ドットへのスピン注入(蓄積)効果に基づいた

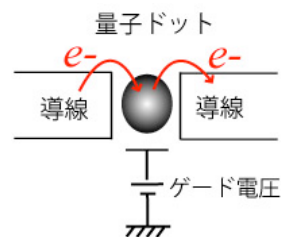


図7. 単電子伝導の模式図.

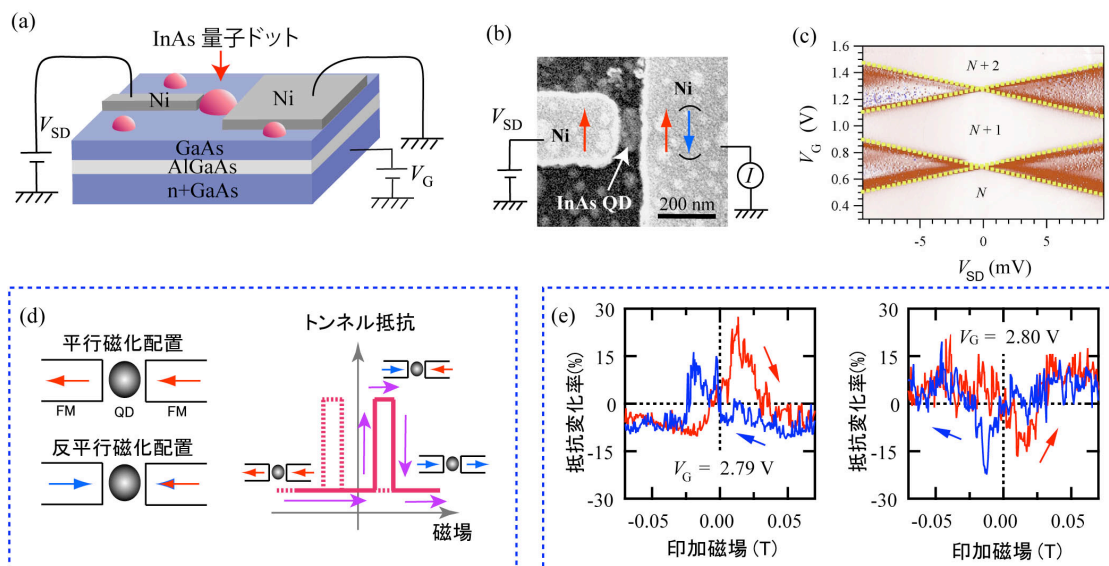


図8. (a)単一電子スピントランジスタ構造の模式図 (Ni 電極/InAs 量子ドット/Ni 電極)。量子ドットのエネルギー準位は、バックゲート電圧  $V_G$  で制御。(b) Ni/InAs/Ni 二重トンネル接合の SEM 像。(c) 50 mK で測定したクーロンダイヤモンド。(d) 強磁性電極と接合した量子ドットの模式図と量子ドット中のスピン蓄積により誘起されるトンネル磁気抵抗 (TMR)効果の模式図。(e) 単一の量子ドットを介した磁気抵抗(MR)の磁場依存性。ゲート電圧( $V_G$ )で TMR 比の符号が変化している。

スピン伝導が検出できると予想されている[不揮発メモリ効果:図 8(d)]。実験結果を図 8(e)に示す。明瞭な不揮発メモリ動作を観測し、さらにその正負の符号はゲート電圧で制御可能である。これらの結果は、これまで困難とされていた強磁性体/半導体素子におけるスピン伝導のゲート電圧制御を十分可能にするものである。

一方、TMR 効果以外の特有の現象もいくつか観測される。図 9 は、強磁性電極(Ni)と InAs 量子ドットの結合が強く、近藤効果が明瞭に観測される試料の微分コンダクタンス( $dI/dV_{SD}$ )の  $V_{SD}$  依存性である<sup>14)</sup>。ここで強磁性電極の磁化配置は、形状磁気異方性を利用しているためにゼロ磁場中でも平行配置となっている。注目すべき点は、外部磁場が 0 T であるにも関わらず近藤共鳴ピークが分裂していることである。この分裂は、外部磁場を約 1.2 T 印加すると消失するが、更に磁場を強くすると再び分裂する様子が観測されている。これらの現象は、強磁性電極の磁化と量子ドット内のスピン(磁化)の間に誘起される交換相互作用の影響を検出した結果であると考えられる<sup>14)</sup>。

また、InAs 量子ドットと接合する電極の片側を非磁性電極(AuTi)とすることで、非磁性電極/量子ドット/強磁性電極という『量子ドットスピンドायオード』構造が実現する[図 10(a)]。斜め蒸着法を用いる事で、このような構造は比較的容易に作製可能である[図 10(b)]。得られたクーロン振動[図 10(c)]から、電子数が  $N=0$  から  $N=1, 2, 3$  というように、明瞭に決定できる人工原子であることを確認した。つまりこの試料は、強磁性電極が接合している状態で、量子ドット中の電子の占有状態を制御できる系である。この試料の代表的な  $I-V_{SD}$  特性(50 mK)を図 10(d)に示す。 $V_G = 1.30$  V において、1 電子

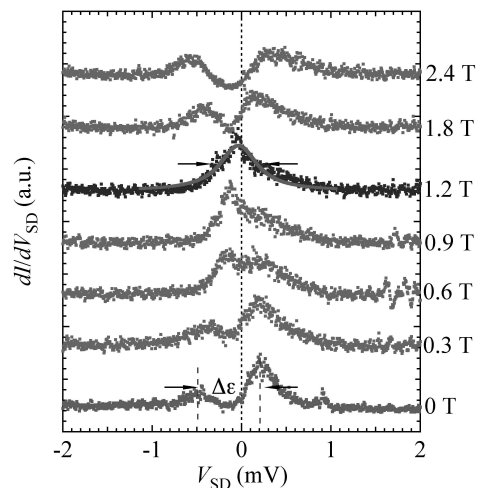


図 9. 近藤共鳴の磁場依存性(平行磁化配置).

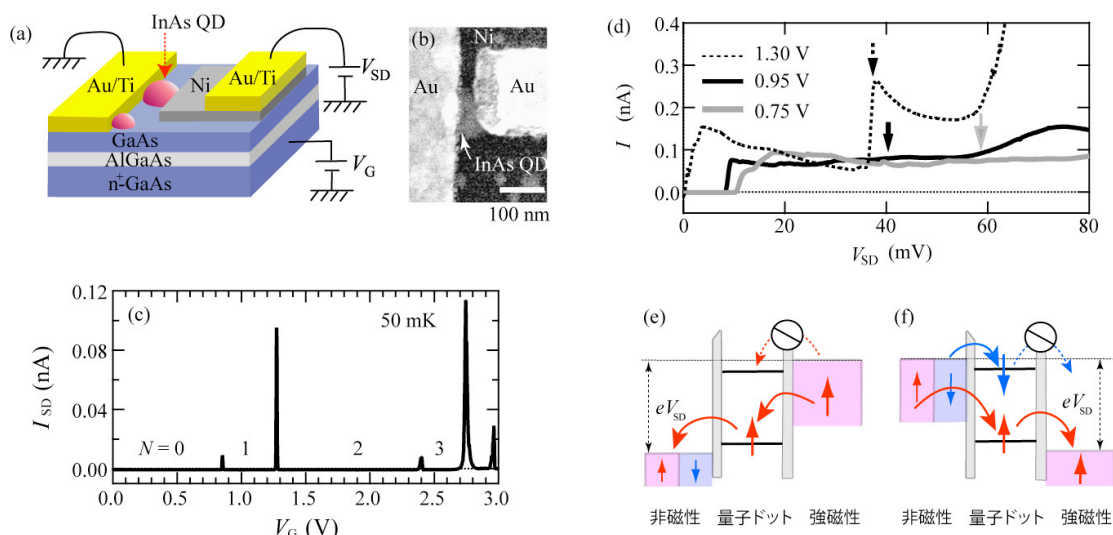


図 10. (a) 量子ドットスピンドાયオード構造の模式図と(b)その SEM 像 (Au/InAs QD/Ni). (c) 50 mK で測定したクーロン振動. (d) 代表的な  $V_G$  における  $I-V_{SD}$  特性. 矢印が 1 電子トンネルから 2 電子トンネルへの遷移が見られる  $V_{SD}$ . (e),(f) 2 電子トンネル過程における量子ドット/強磁性電極間のスピンプロケイド過程の模式図.

トンネルから2電子トンネルへの遷移を反映して、 $V_{SD}=38\text{ mV}$  付近(点線矢印)に明瞭な電流の増大が観測されるのに対し、 $V_G=0.75\text{ V}$  および  $0.95\text{ V}$  のデータからは、2電子トンネル過程に遷移(実線矢印)しても電流の増大はほとんど観測されていない。これは、電子数2の量子ドットと強磁性電極の間にスピン選択的な伝導[図 10(e),(f)]が生じた結果であると考えられる<sup>15)</sup>。つまり、結合二重量子ドット系におけるスピنبロッキングに類似する現象が、単一量子ドット系で観測されていることを初めて観測した例である。以上のように、量子ドット中の電子数や軌道状態を制御することで発現する人工原子特性と、スピン機能を重畳すれば、スピンを基本とした多機能素子『単電子スピントランジスタ』の創出が可能となることを示唆している。

## 5. おわりに

筆者が取り組んでいる新しい研究分野『半導体ナノスピントロニクス』研究の成果の一部を紹介した。これらの研究が発展し、半導体スピントロニクス素子が世に送り出される事を期待している。

本稿で紹介した研究は、九州大学 システム情報科学研究院 宮尾正信特任教授、稲盛フロンティア研究センター 木村崇教授、東京大学生産技術研究所 町田友樹准教授、平川一彦教授、荒川泰彦教授との共同研究であり、ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 高梨弘毅：応用物理 77, 255 (2008).
- 2) 藤崎芳久：応用物理 77, 1060 (2008).
- 3) S. Sugahara and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett. **84**, 2307 (2004).
- 4) I. Appelbaum *et al.*, Nature **447**, 295 (2007).
- 5) S. P. Dash *et al.*, Nature **462**, 491 (2009).
- 6) K. Hamaya *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 132117 (2008).
- 7) S. Yamada *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 082511 (2010).
- 8) K. Hamaya *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 137204 (2009); K. Ueda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 112108 (2008); Y. Ando *et al.*, J. Appl. Phys. **105**, 07B102 (2009); S. Yamada *et al.*, Thin Solid Films, **518**, S278 (2010).
- 9) T. Kimura, N. Hashimoto, S. Yamada, M. Miyao, and K. Hamaya, (submitted).
- 10) T. Kimura and Y. Otani, J. Phys.: Condens. Matter. **19**, 165216 (2007).
- 11) Y. Ando *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 182105 (2009); Y. Ando *et al.*, Appl. Phys. Express **3**, 093001 (2010); K. Hamaya *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 010101 (2011).
- 12) L. P. Kouwenhoven, D. G. Austing, and S. Tarucha, Rep. Prog. Phys. **64**, 701 (2001).
- 13) K. Hamaya *et al.*, Appl. Phys. Lett. **90**, 053108 (2007); Appl. Phys. Lett. **91**, 022107 (2007); Phys. Rev. B **77**, 081302(R) (2008); Appl. Phys. Lett. **93**, 222107 (2008).
- 14) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, M. Kawamura, K. Hirakawa, T. Machida, T. Taniyama, S. Ishida, and Y. Arakawa, Appl. Phys. Lett. **91**, 232105 (2007).
- 15) K. Hamaya, M. Kitabatake, K. Shibata, M. Jung, S. Ishida, T. Taniyama, K. Hirakawa, Y. Arakawa, and T. Machida, Phys. Rev. Lett. **102**, 236806 (2009).