

純スピン流制御技術とそのデバイス応用 ～次世代 省エネルギー電子デバイスの実現に向けて～

九州大学 稲盛フロンティア研究センター
次世代エレクトロニクス材料研究部門
教授 木村 崇

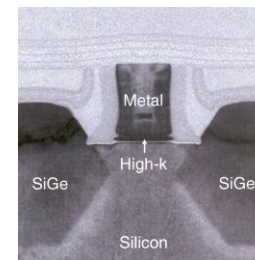


九州大学

これまでのエレクトロニクスデバイス

Si CMOS トランジスタの微細化により デバイスを高性能化

数々の限界説を乗り越え、数十nm世代を実現



45 nm トランジスタ
(Intel社より)

**次世代電子デバイスに対する社会的要請：
低消費電力化, 高信頼性, 高速性, 大容量化**

↓
微細化のみでは実現困難

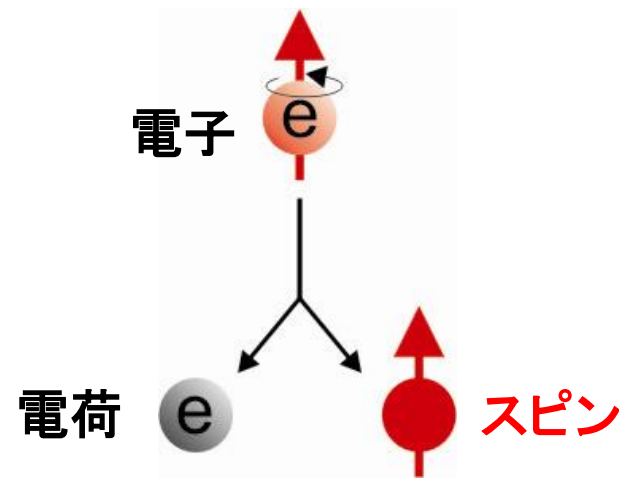
新材料・新構造を用いたMOSFET
新動作原理に基づくメモリや演算回路

} への期待

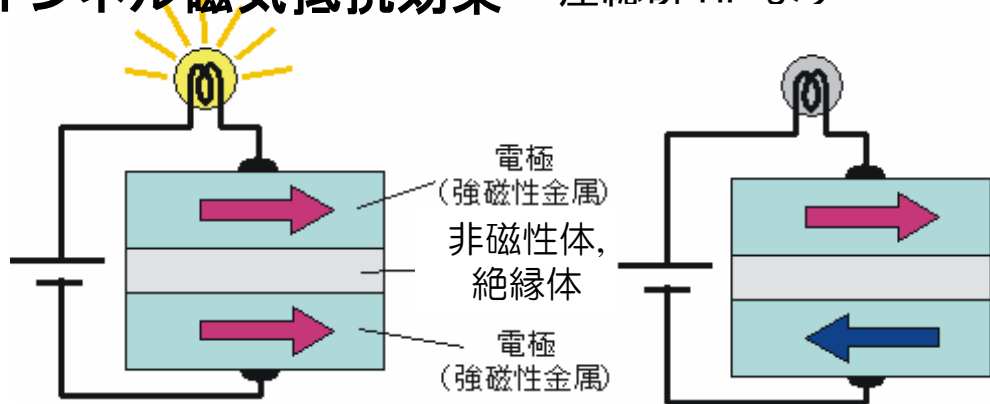
**磁石のメモリ効果を利用した
省エネルギー・ナノエレクトロニクスデバイス**

スピン依存伝導現象

電子の電荷の流れ(電流)ではなく、
スピン角運動量の流れ(スピン流)
が重要な役割を担う。



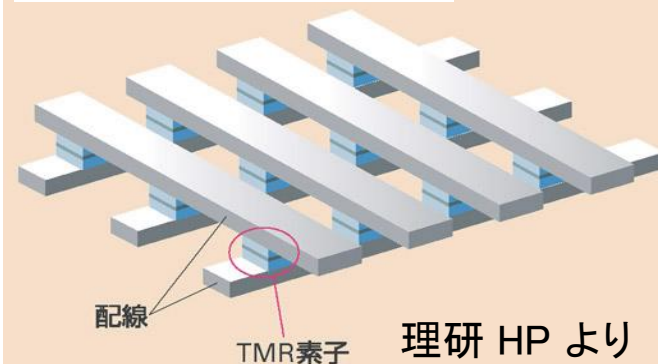
トンネル磁気抵抗効果 産総研 HP より



スピン流が流れやすい
→ 電気抵抗小

スピン流が流れにくい
→ 電気抵抗大

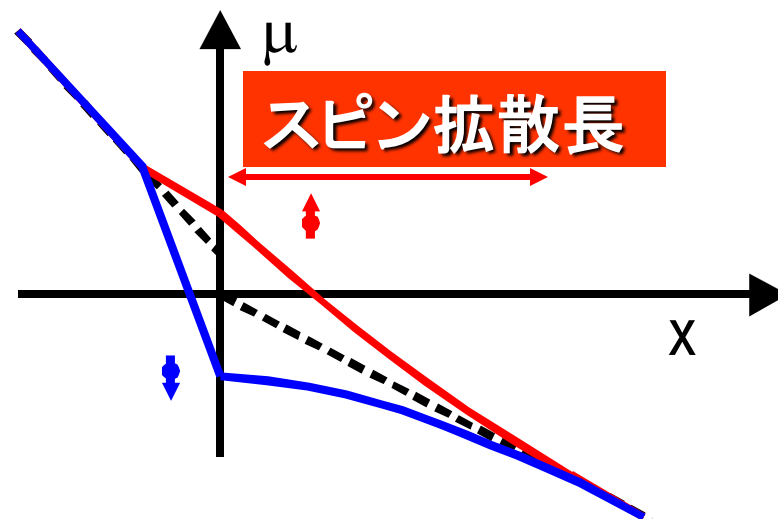
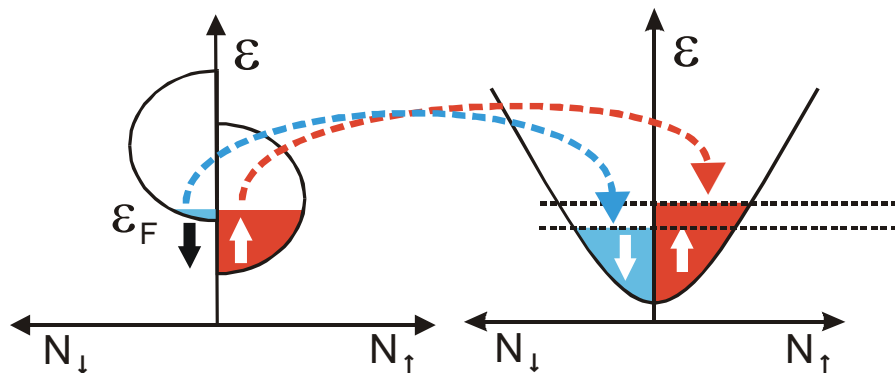
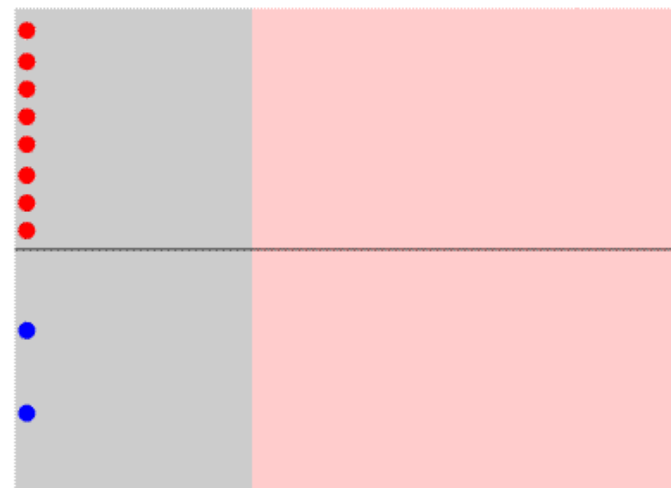
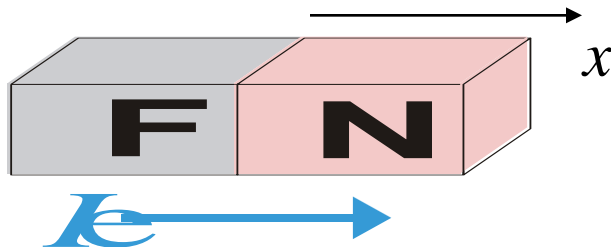
Spin RAM の模式図



- ・ 不揮発・低消費電力・高速・高集積・長寿命等の特徴

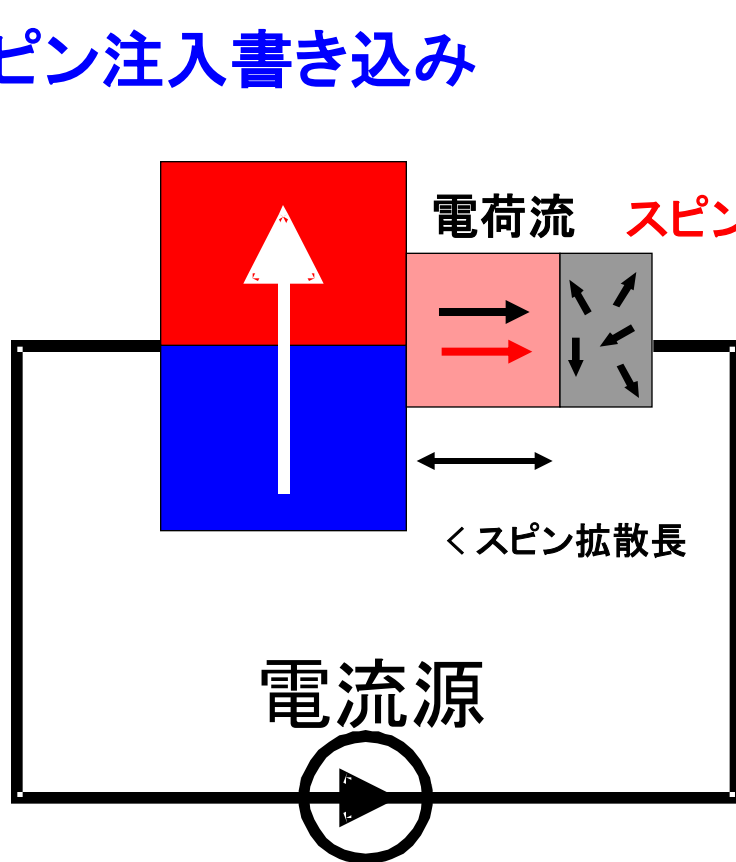
スピンの散乱されない極清浄な強磁性/非磁性接合界面を作製し、界面を横切るように電流を流す。

➡ 非磁性体内にスピン流が注入



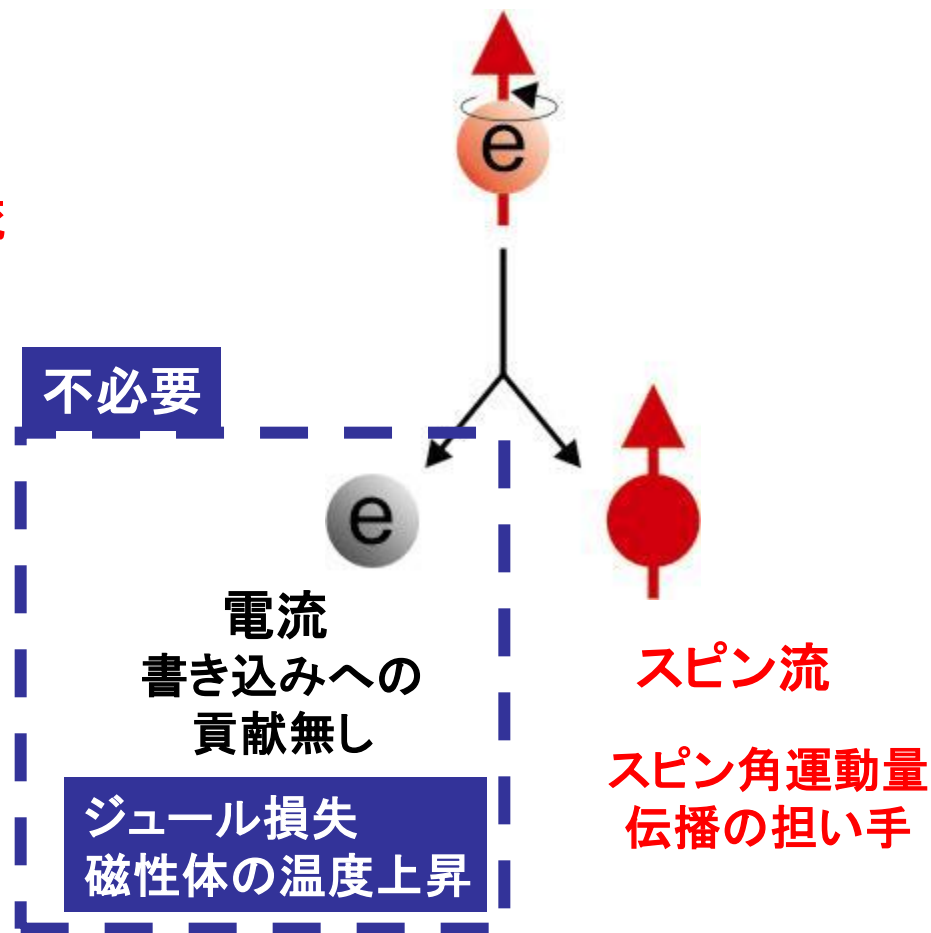
非磁性体内に、スピン拡散長の範囲でスピンの蓄積する。

スピン注入書き込み



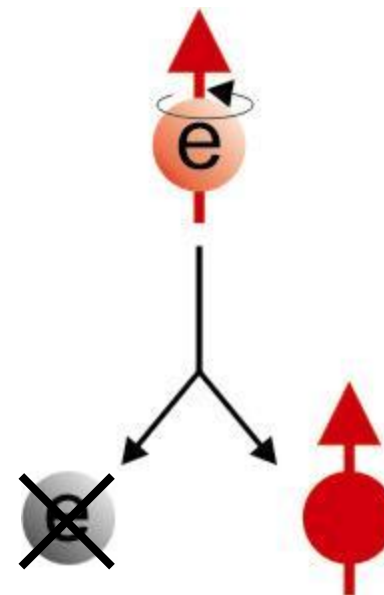
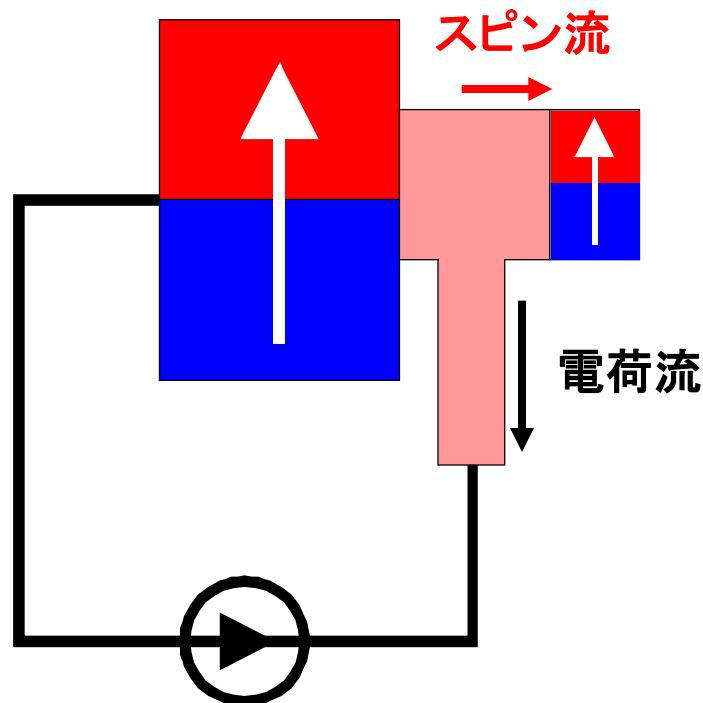
大きな磁石の電子が持つスピンの角運動量を、小さな磁石に伝播させ磁化する。

(角運動量保存の法則)



高集積化 ○
高速動作 ○
消費電力 △

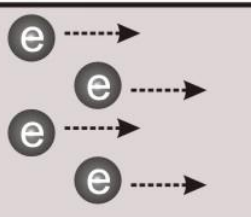
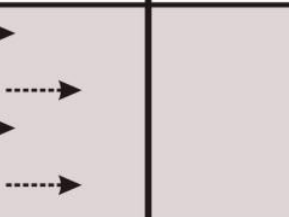




純スピン注入書き込み



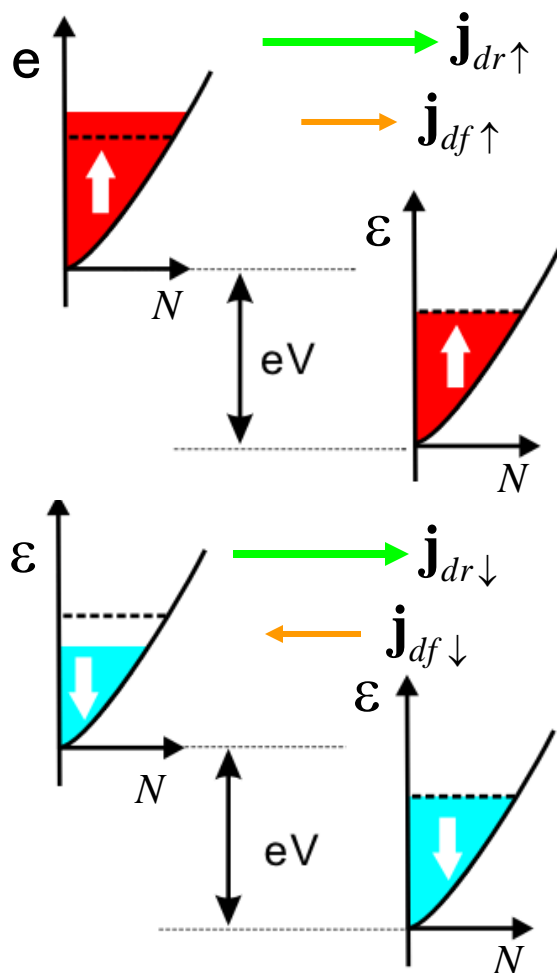
高集積化 ○
高速動作 ○
消費電力 ○

電子の持つ電流を排除し、
書き込みに必要な
スピン流だけを磁性体に注入

すべてを兼ね備えた
究極の書き込み技術？

	電流	スピン流	
非偏極電流		0	従来型 エレクトロニクス
スピン偏極電流			従来型 スピントロニクス
完全偏極電流			次世代 スピントロニクス
純スピン流	0		

本講演で紹介するスピン流



$$\mathbf{j}_{\uparrow,\downarrow} = \underbrace{\sigma \frac{\partial V}{\partial x}}_{\text{ドリフト電流}} + \underbrace{eDN_{\uparrow,\downarrow} \frac{\partial \varepsilon_{\uparrow,\downarrow}}{\partial x}}_{\text{拡散電流}}$$

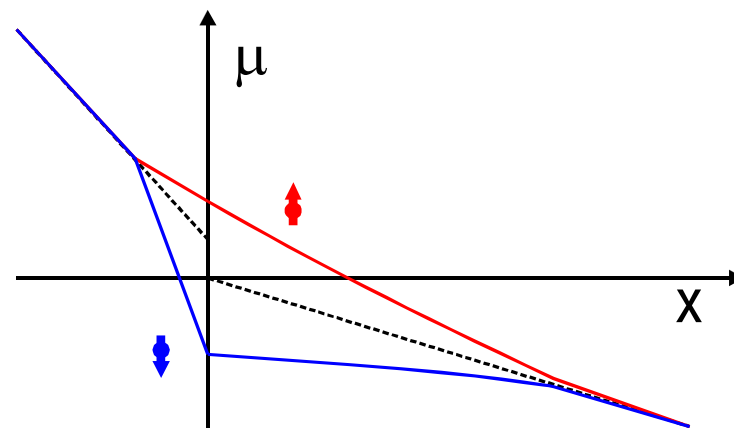
ドリフト電流

拡散電流

$$\mathbf{j}_{dr\uparrow,\downarrow}$$

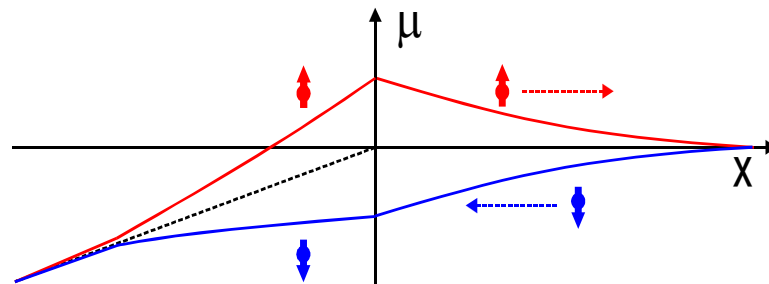
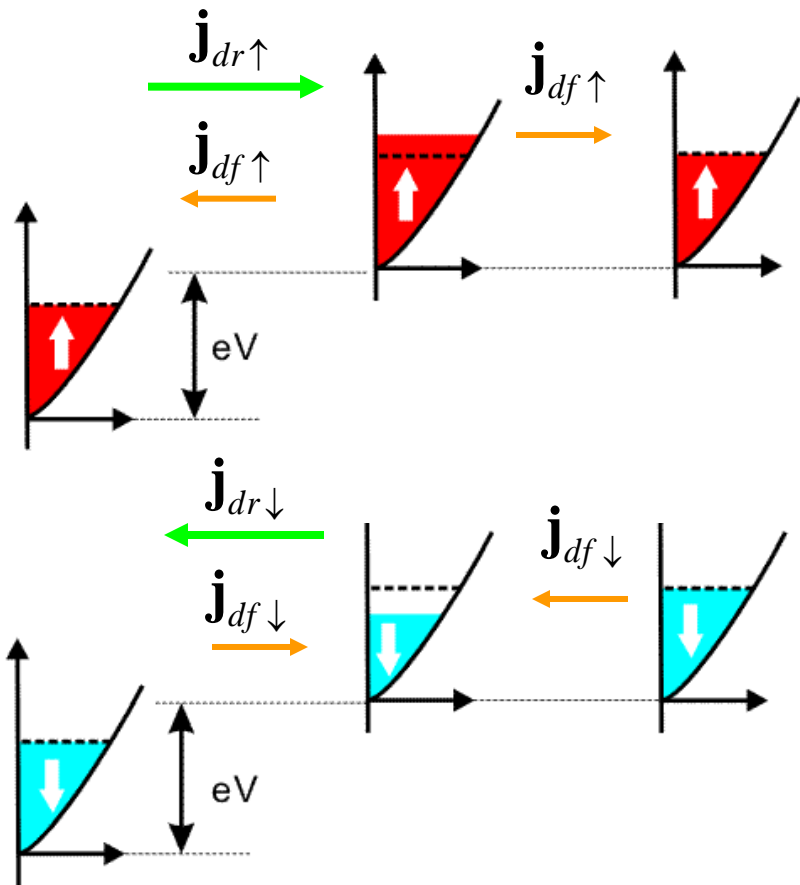
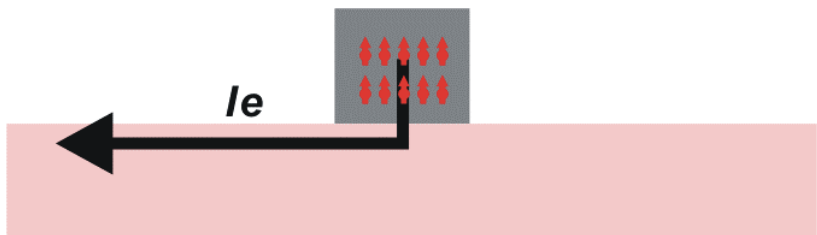
$$\mathbf{j}_{df\uparrow,\downarrow}$$

$$\mu_{\uparrow,\downarrow} = \varepsilon_{\uparrow,\downarrow} + eV \quad j_{\uparrow,\downarrow} = \frac{\sigma}{2} \frac{\partial \mu_{\uparrow,\downarrow}}{\partial x}$$



$$j = j_{\uparrow} + j_{\downarrow} = 2j_{dr}$$

$$j_s = j_{\uparrow} - j_{\downarrow} = 2j_{df}$$



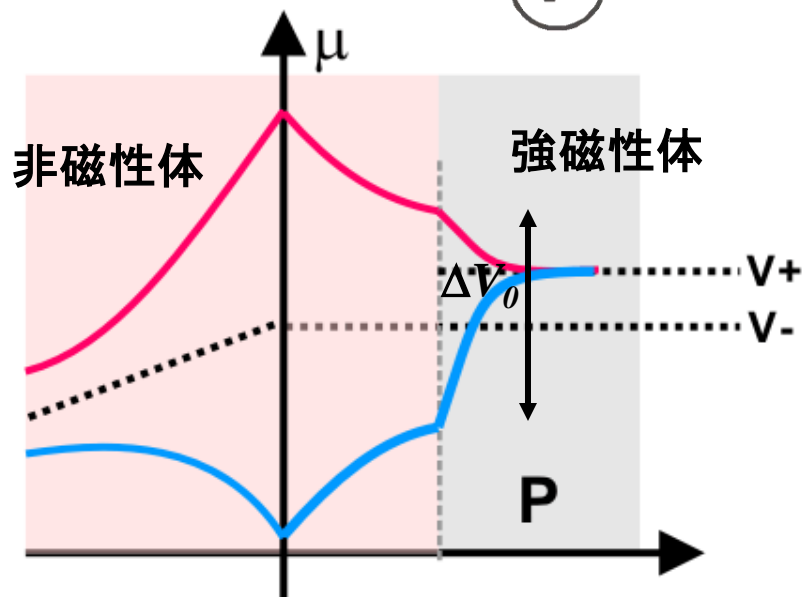
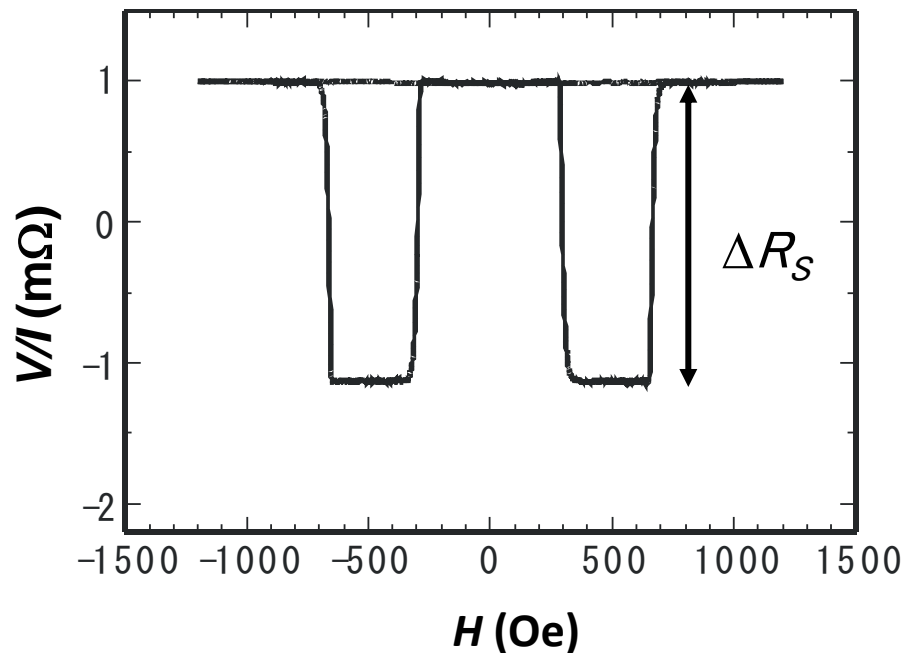
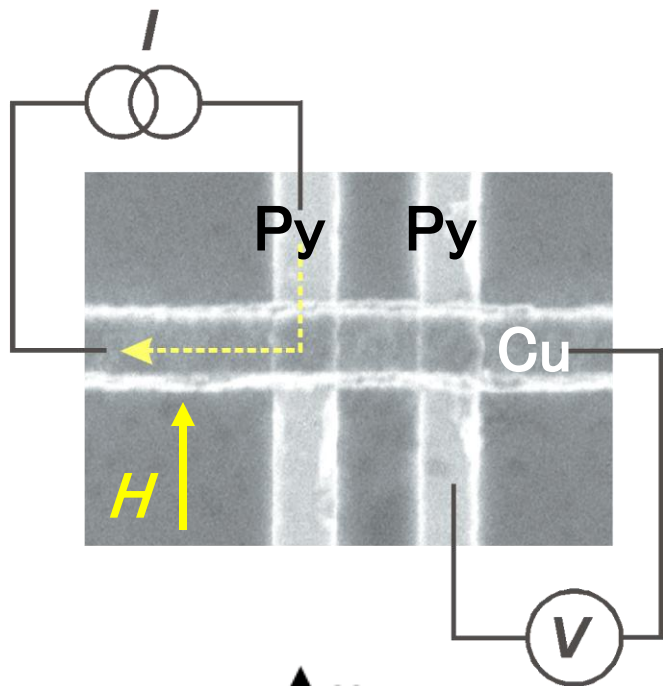
$$j = j_{\uparrow} + j_{\downarrow} = 2j_{dr} \quad j = j_{\uparrow} + j_{\downarrow} = 0$$

$$j_S = j_{\uparrow} - j_{\downarrow} = 2j_{df} \quad j_S = j_{\uparrow} - j_{\downarrow} = 2j_{df}$$

電流
+
スピン流

スピン流のみ

非局所注入法を使えば、
スピン流のみを取り出せる。



ΔR_S : スピン信号

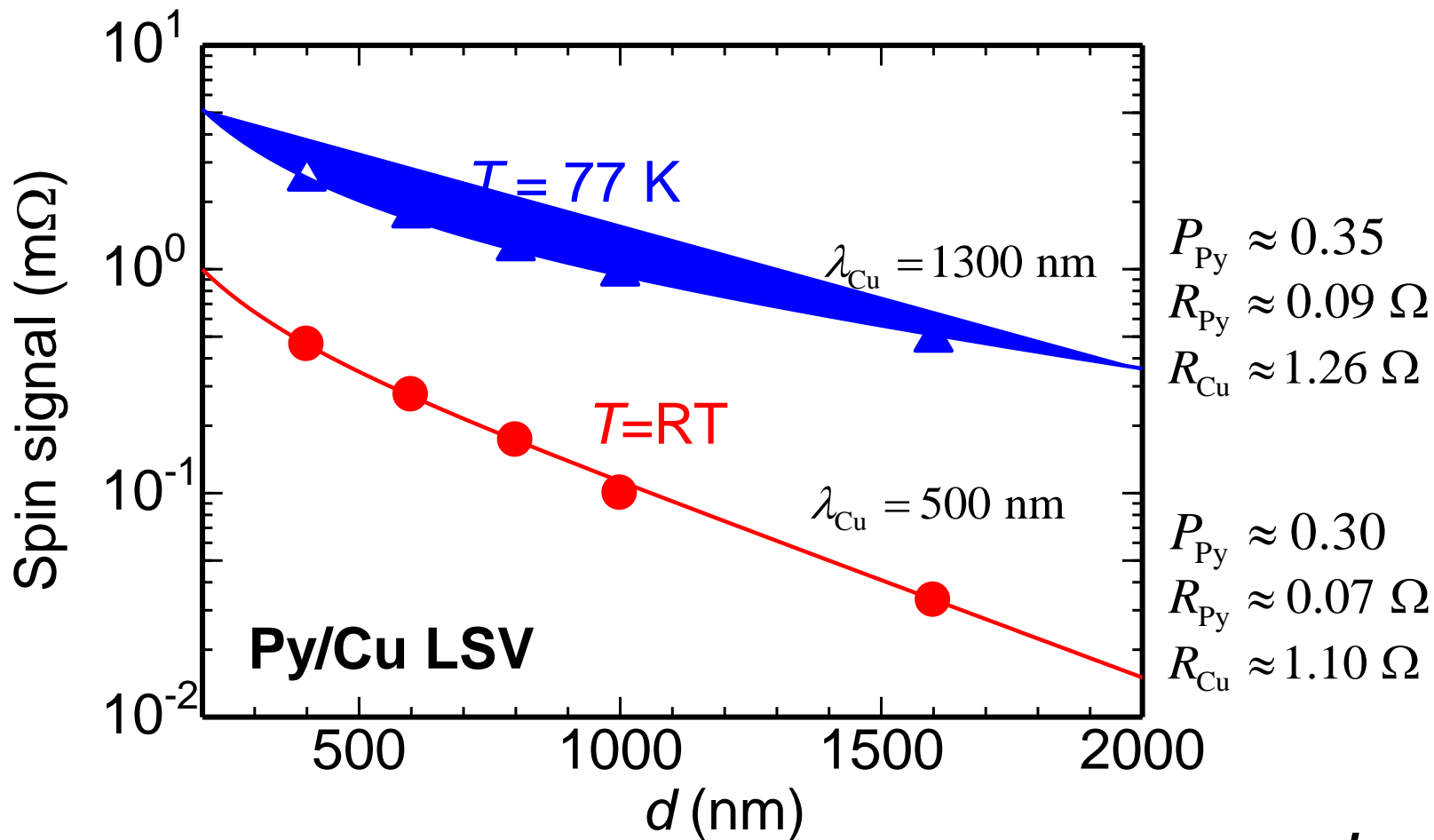
純スピン流デバイスの
バロメーター

$$J_{\uparrow} + J_{\downarrow} = 0$$

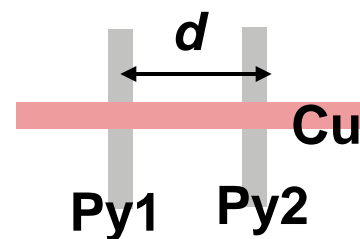
$$\sigma_{\uparrow} \neq \sigma_{\downarrow}$$

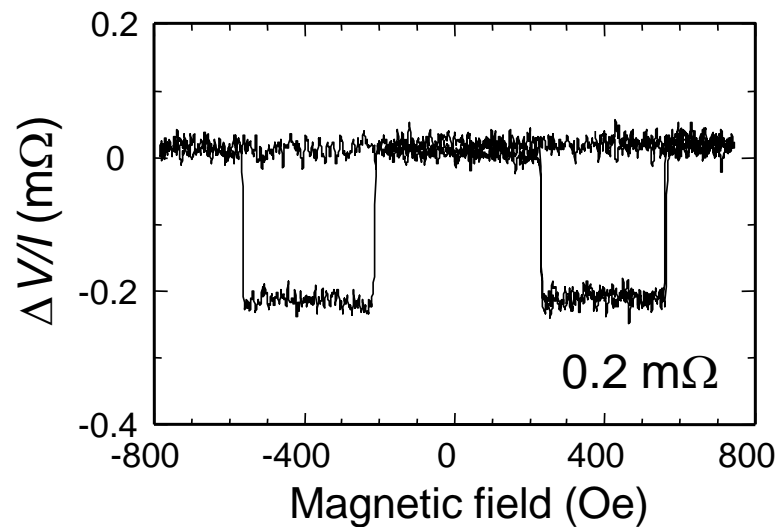
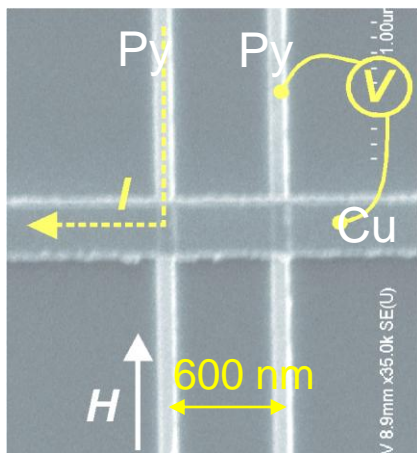
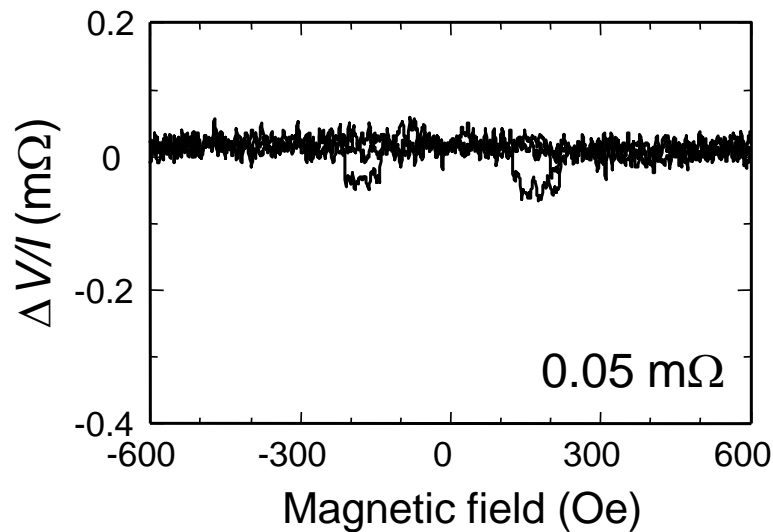
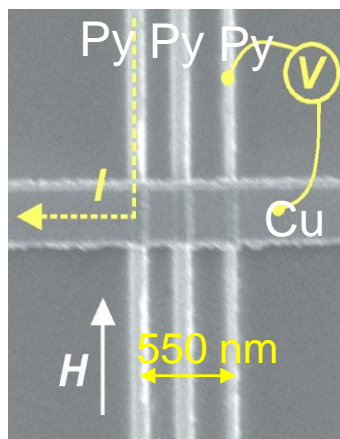
$$\Delta V = P \Delta V_0$$

$$P = \frac{\sigma_{\uparrow} - \sigma_{\downarrow}}{\sigma_{\uparrow} + \sigma_{\downarrow}}$$



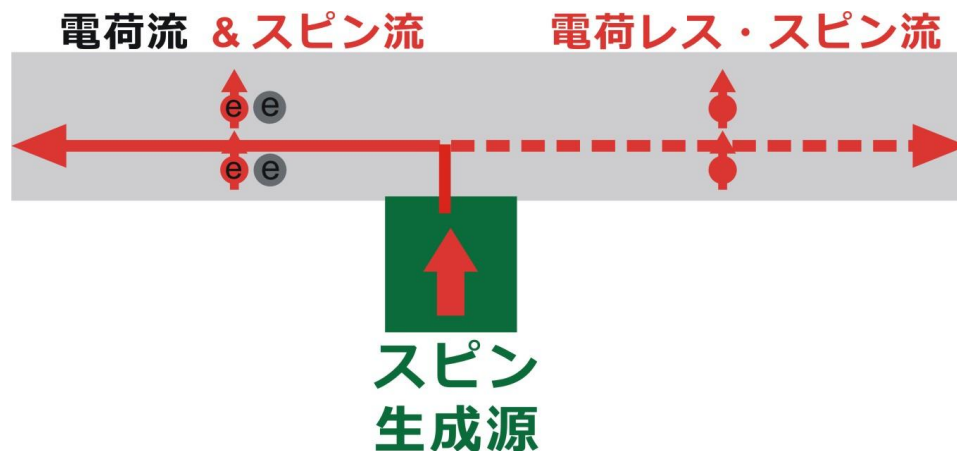
$$R_s = \frac{P^2 R_{\text{Cu}} R_F^2}{2R_F(R_{\text{Cu}} + R_F) \cosh[d/\lambda] + (R_{\text{Cu}} + 2R_{\text{Cu}}R_F + 2R_F^2) \sinh[d/\lambda]}$$



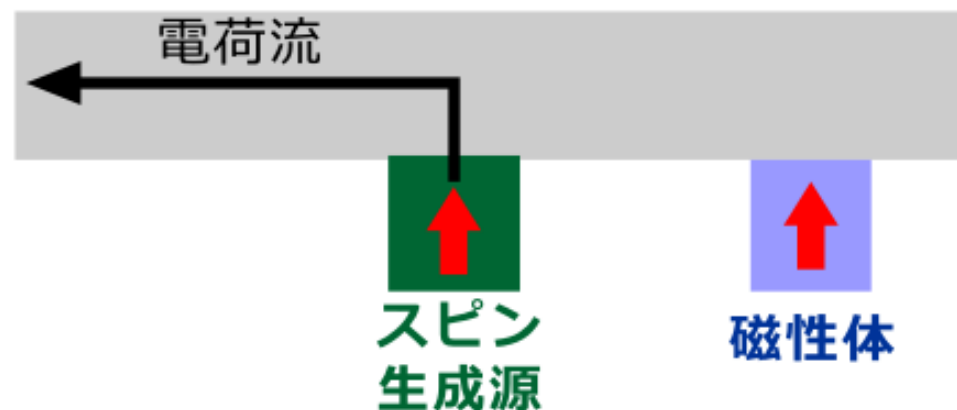
Without middle wire**With middle wire**

Phys. Rev. B 72, 014461 (2005)

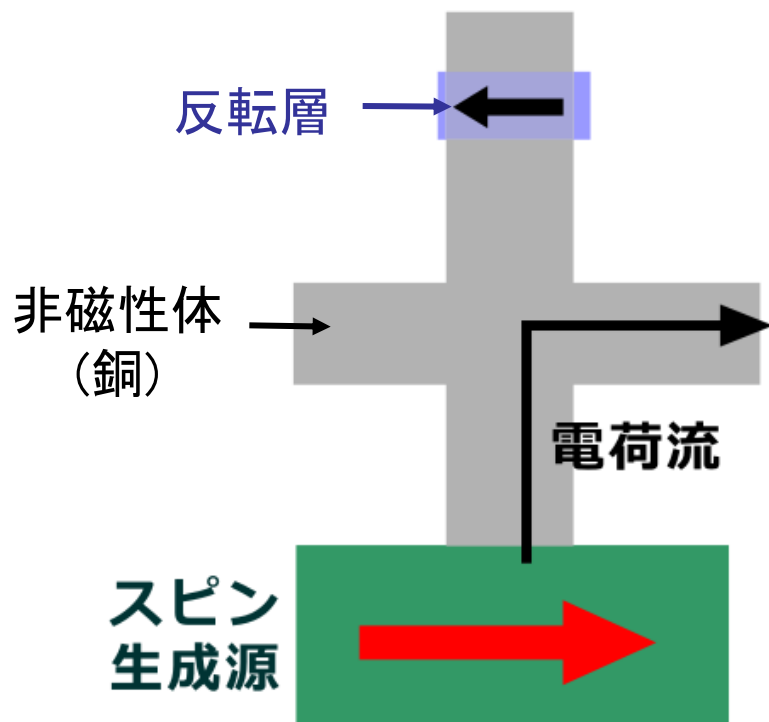
•非磁性体のみ



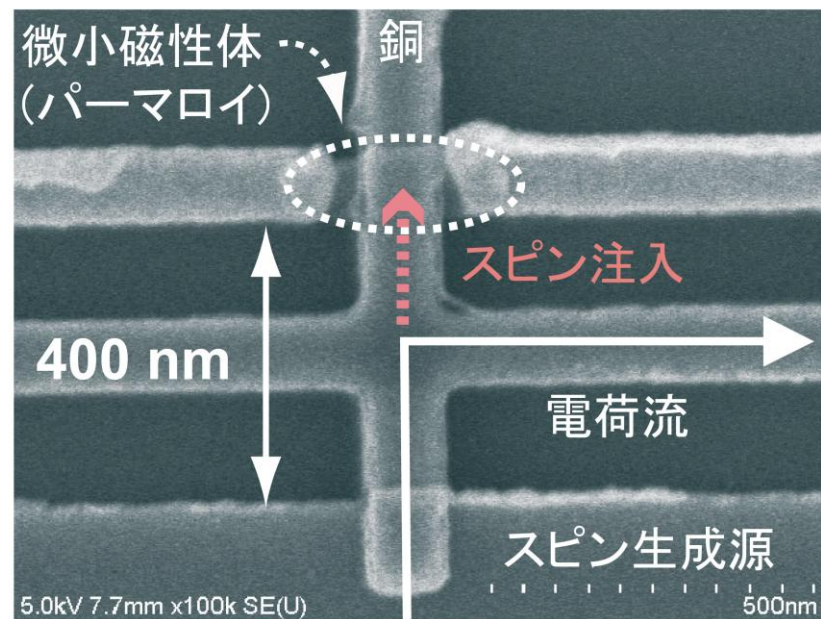
•非磁性体+磁性体



スピン緩和の強い
磁性体側へ選択的に拡散
(スピン吸収効果)

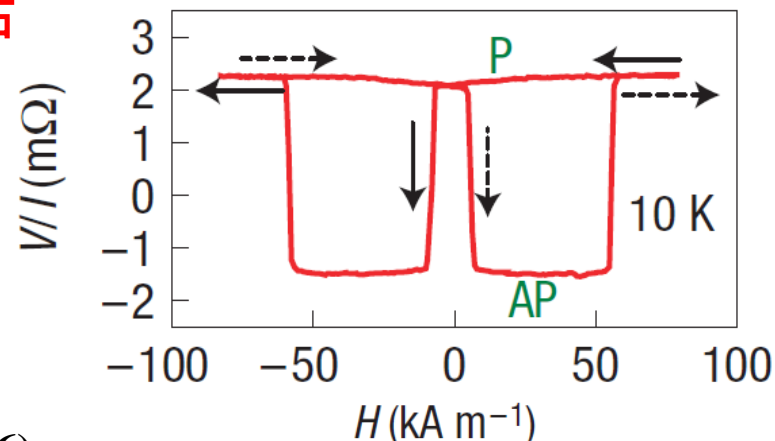
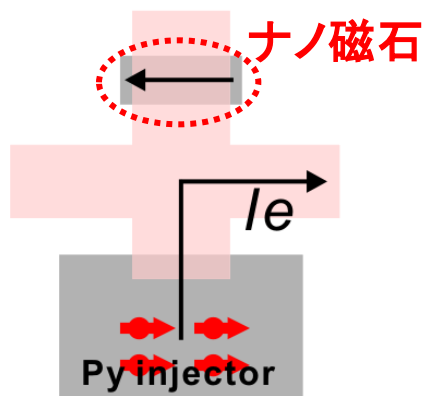
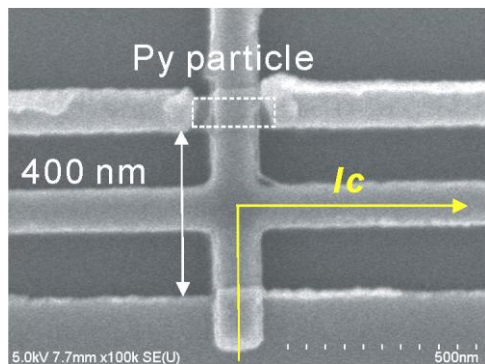


Phys. Rev. Lett. 96, 037201 (2006)
Nature Physics 4, 851 (2008)



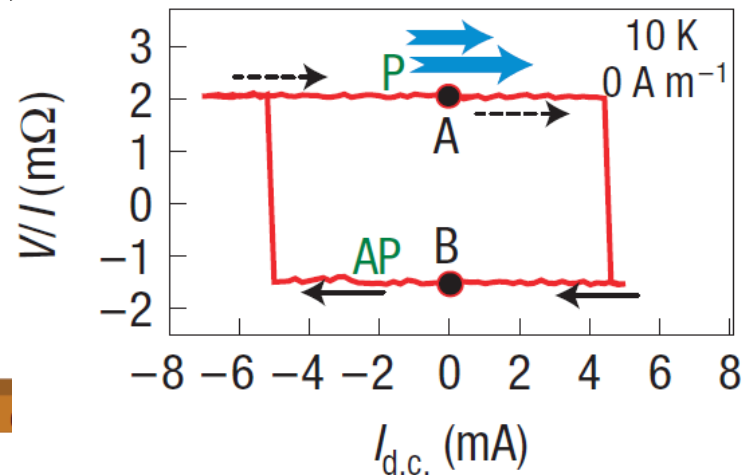
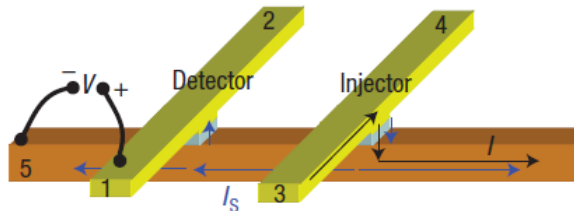
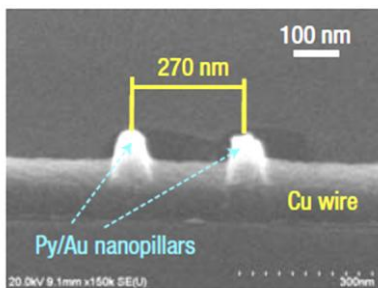
膜厚 4nm の 微小 パーマロイ 磁性体

スピンのみによる磁化反転に世界で初めて成功



Phys. Rev. Lett. 96, 037201 (2006)

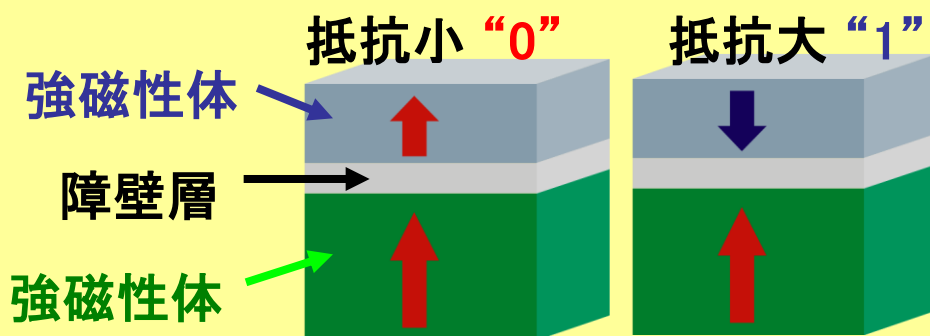
更なる極微細化・低電力化を実現



Nature Physics 4, 851 (2008)

代表的スピンドバイス

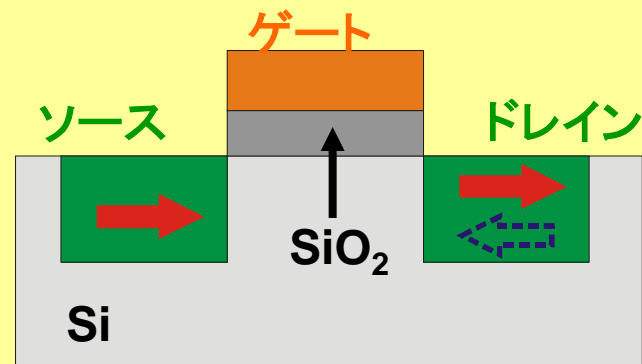
スピンRAM



強磁性トンネル接合

64 Mbit 素子の試作。一部商品化

スピンMOSFET



MOSFETと記憶素子を一体化

スピンドバイス極微化への課題

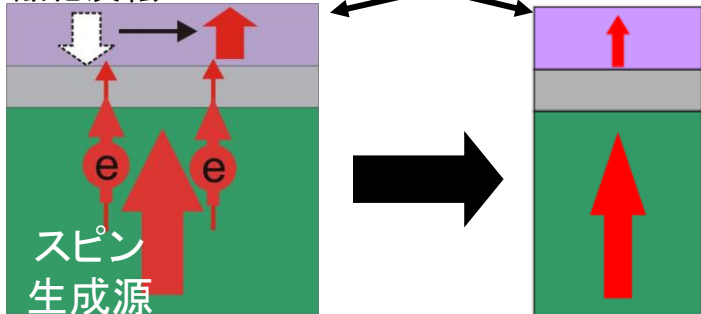
“低消費電力書き込み動作”と“熱擾乱耐性”の両立
(磁化反転)

次世代スピンRAMにおける課題

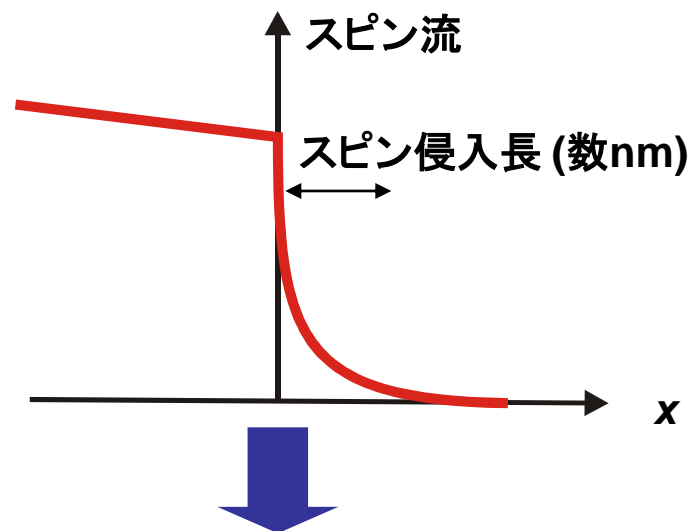
極微細化による磁化不安定性

極薄反転層 (< スピン侵入長: ~5nm)

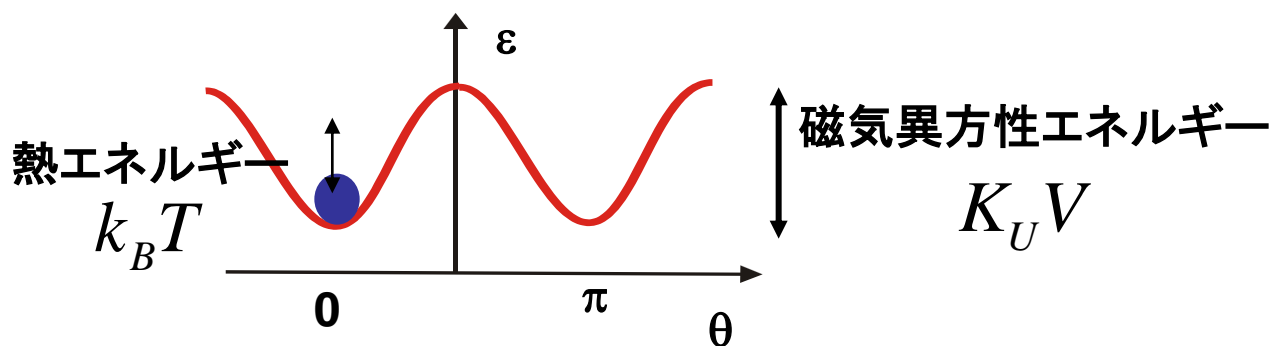
磁化反転 "1" → "0"

現状
(~100nmφ)次世代
(~40nmφ)

スピン流は、強磁性体中に侵入すると急速に減衰する。



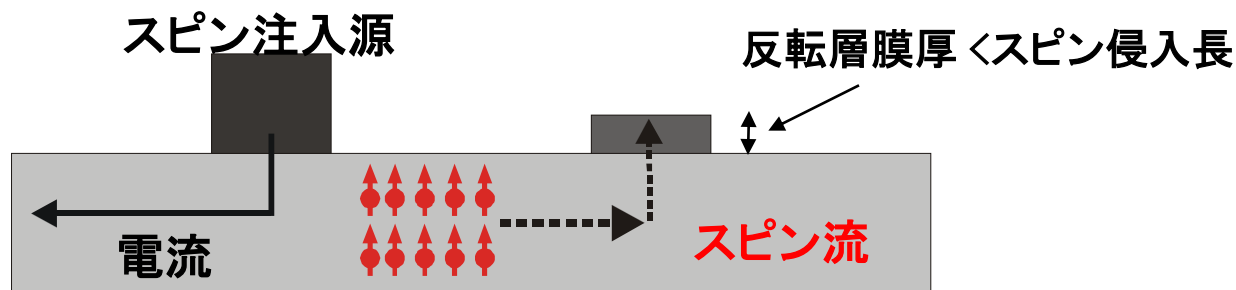
スピン侵入長以上の厚さを持つ磁性体は、反転できない。



熱擾乱耐性の維持

$$K_u V \gg k_B T$$

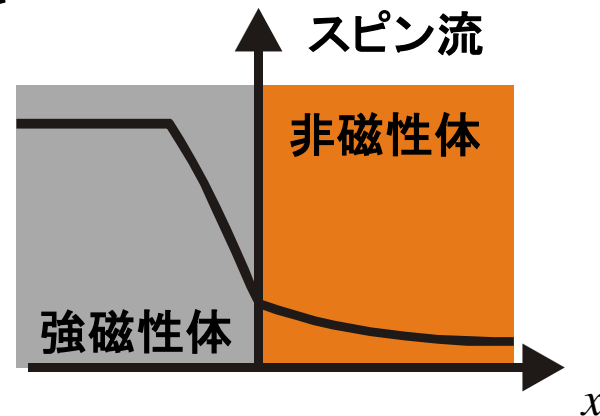
- 純スピンの注入法でも、従来型のスピン注入同様、厚さ数nm程度の極薄微細磁性体のみ磁化反転が可能。



- 純スピンの生成効率が極めて小さい

注入源から発生する大半のスピン流は、スピン緩和の強い注入元の強磁性体側に再吸収される。

➡ 非磁性体への注入スピン流は極小



従来の純スピンドラ注入法では、
厚さ数nm程度の極薄微細磁性体のみ磁化反転が可能。

➡ 埋め込み構造による三次元純スピンドラ注入

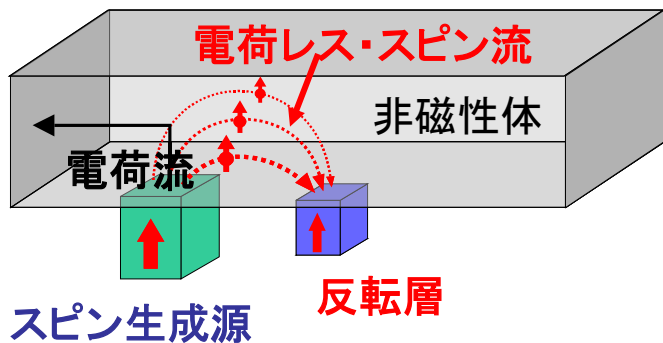
従来のスピンドラ注入では、始動トルクが小さく
磁化の反転時間が長い。

➡ 多端子スピンドラ生成源による
電気的な高速スピンドラ方向制御

純スピンドラの生成効率が小さい

➡ 構造、電極、材料の最適化による
生成効率の向上

これまでの純スピン流注入技術

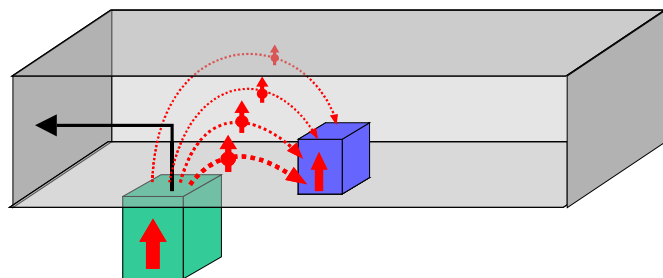


上面からのスピン吸収

磁化反転実現の為の制約

反転層の膜厚 < スピン侵入長

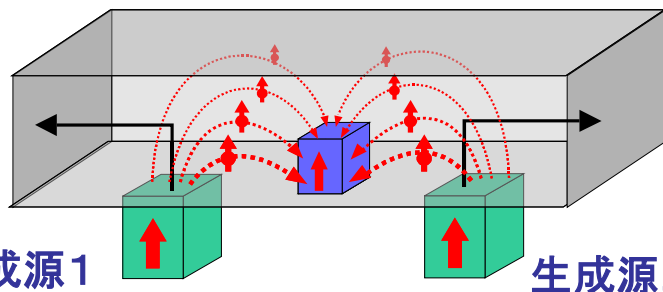
現在開発中の新しい純スピン流注入技術



反転層の埋め込み

→ 側面からのスピン吸収

→ 三次元スピン注入

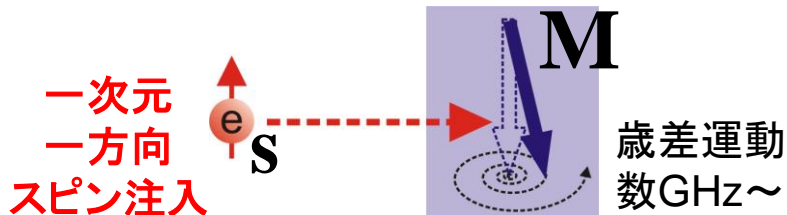


スピン生成源の多端子化

→ 巨大スピン流の生成

→ 厚膜磁性体の磁化反転
(膜厚 > スピン侵入長)

従来型スピン注入



スピントルク
 $\propto S \times M$

始動トルク:小
→ 磁化反転:遅

純スピン流の多端子スピン注入

シーズ技術

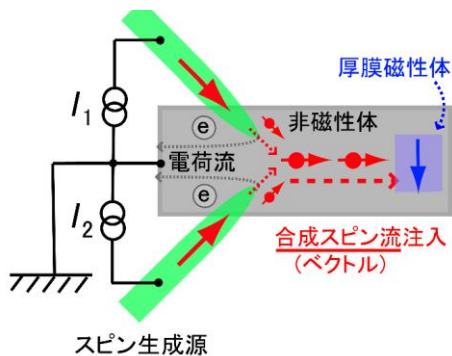
- ・スピン方向の電氣的制御
- ・磁化ダイナミクス検出技術
- ・LLG 方程式シミュレーション

Phys. Rev. Lett. 99, 166601 (2007).

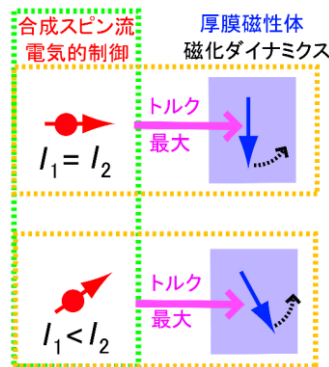
高速変調
スピン流

スピントルクの最適化
→ 磁化反転:速

非同軸スピン生成源



ベクトル合成で、
スピン方向を
電氣的に制御

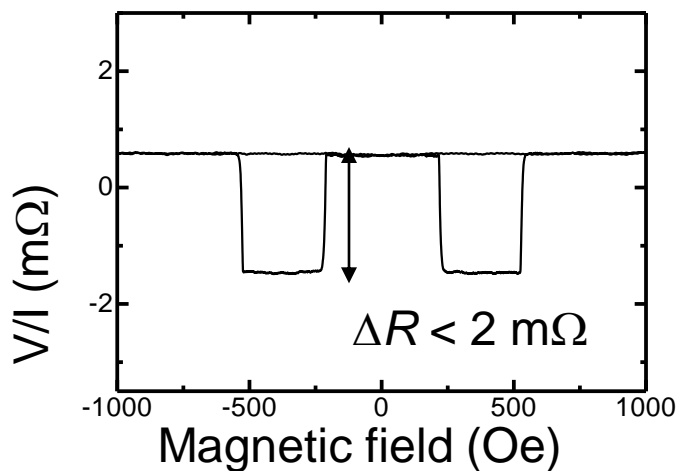
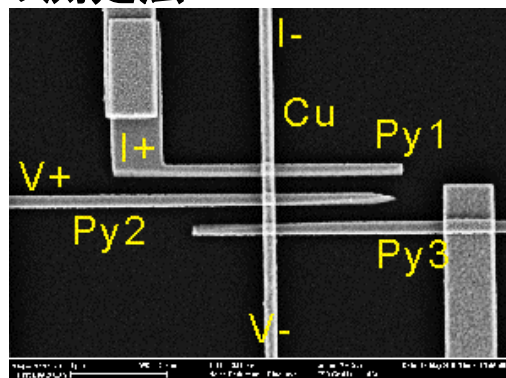


磁化と直交する
ように、スピン
方向を高速制御

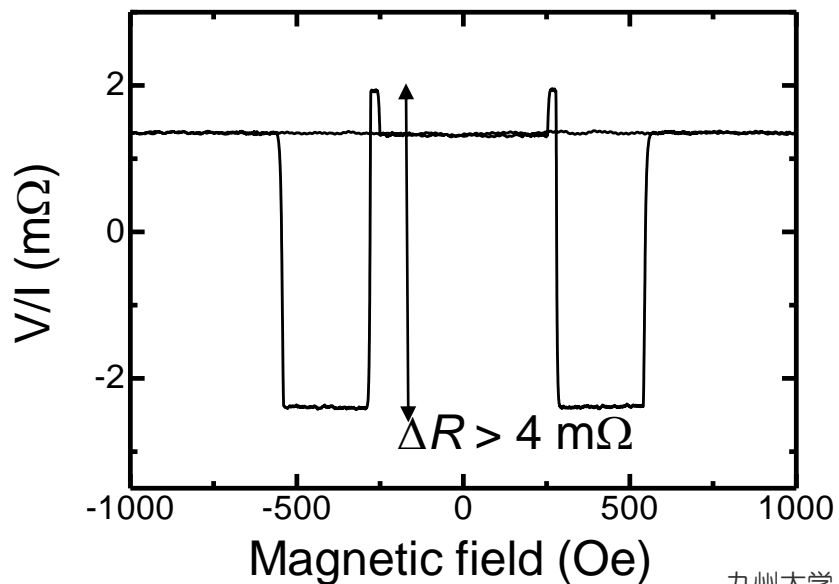
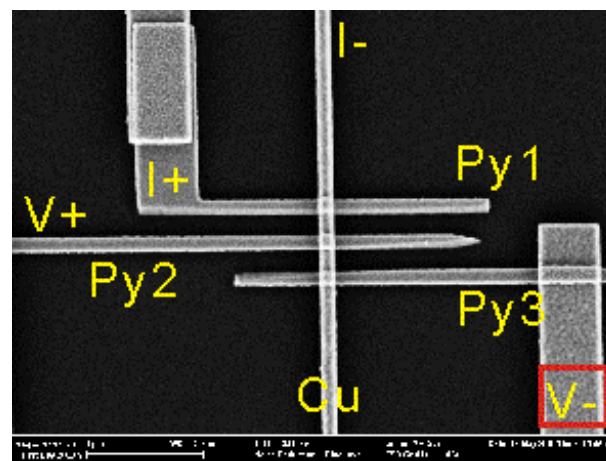
多端子スピン注入による生成効率の向上

Appl. Phys. Lett. 85, 5382 (2004)

通常の測定法



特殊測定によるスピン信号の増大

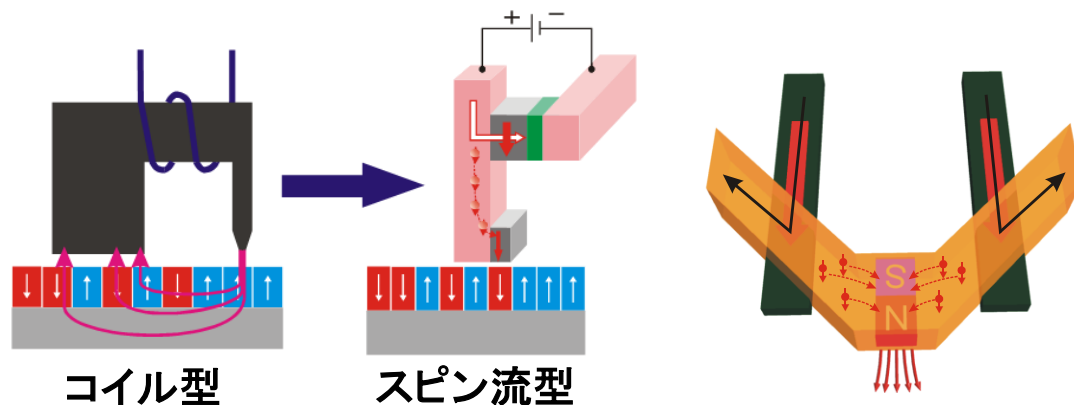


スピンド制御型書き込み磁気ヘッド

磁化の大きな磁性体の
スピンド注入で磁化反転さ
せる唯一の方法

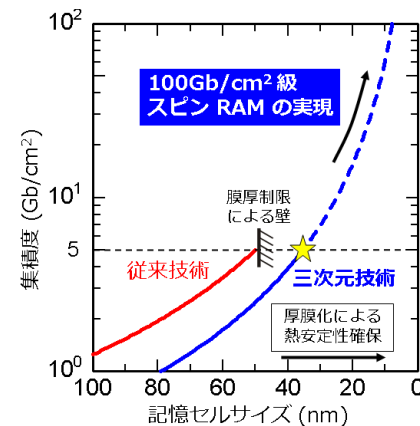
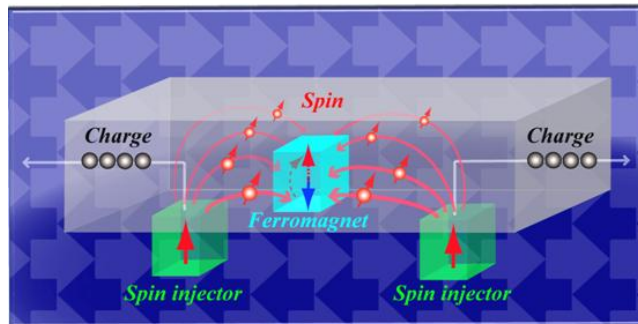
万能な局所磁界発生装置
として、様々な応用分野

次世代書き込み磁気ヘッド



厚膜ナノ磁性体の磁化反転

電荷レス・スピンド流の三次元
注入技術を開発し、熱擾乱に
よるスピンドデバイスの集積化
限界を打破。



本技術に関する知的財産権

発明の名称：磁化反転装置、記憶素子、
及び磁界発生装置

出願番号：PCT/JP2010/061693

出願人：九州大学

発明者：木村 崇、浜屋宏平

お問い合わせ先

九州大学知的財産本部アソシエイト
(株)産学連携機構九州(九大TLO) 松尾 多聞

TEL 092-643-9467

FAX 092-642-4365

e-mail matsuo@k-uip.co.jp