

スピン流を用いた新機能デバイス 実現に向けた技術開発

プログラムオフィサー(PO)

安藤 功兒

スピン流を用いるデバイスの可能性

背景

スピントロニクス

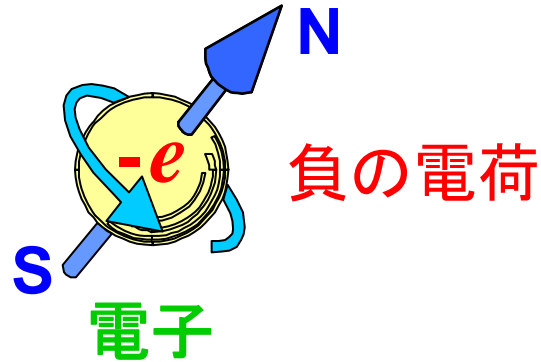
← 応用から見た名称

スピン流

← 学理から見た名称

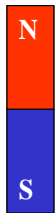
スピントロニクス

電子スピン
(小さな磁石)

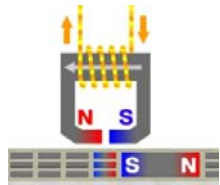


磁気工学

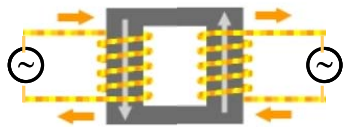
磁気



磁石



磁気記録



トランス

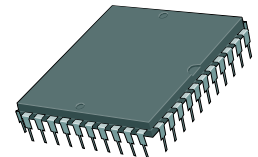
融合

半導体工学



レーザー

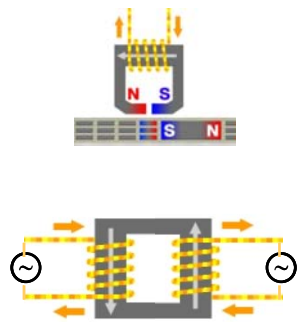
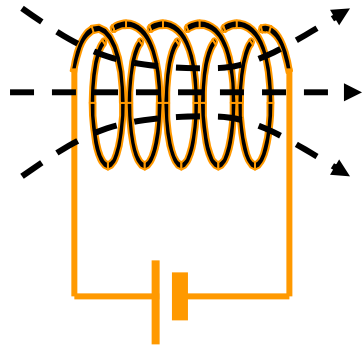
光



LSI

電気

なぜ今、スピン流なのか？

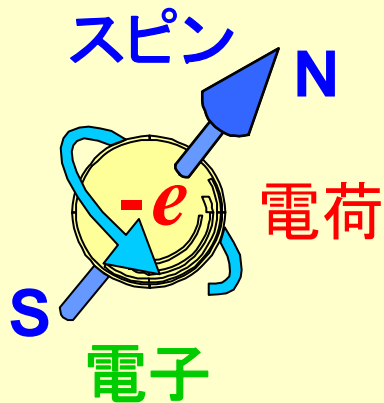


従来の磁気—電気結合技術

スピンと電荷の結合には、コイルで磁場を発生する電磁誘導を利用
(極めて低効率)

ナノテクの進歩

古典電磁気学から量子力学へ



スピン流

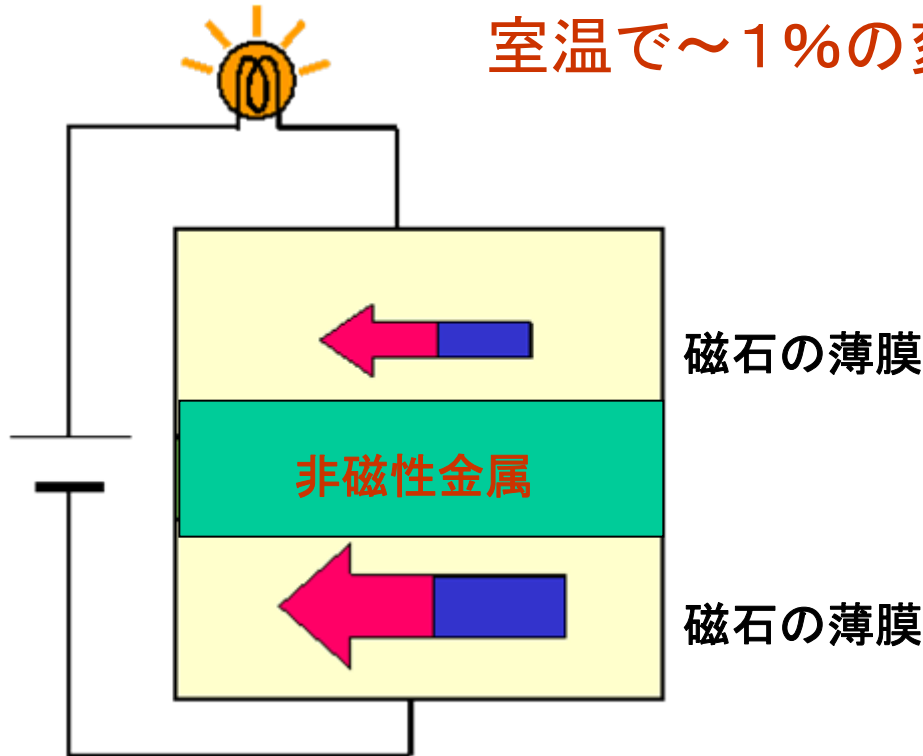
量子力学を用いて
スピンと電荷の直接的結合が可能に
(極めて高効率)

現在、急速なパラダイムシフトが起きている

1985年 巨大磁気抵抗効果 (GMR)の発見

スピン(磁化)の向きで電気抵抗が変わる(MR比)！

室温で～1%の変化



厚みはナノスケール



Dr.Gruenberg Prof. Fert

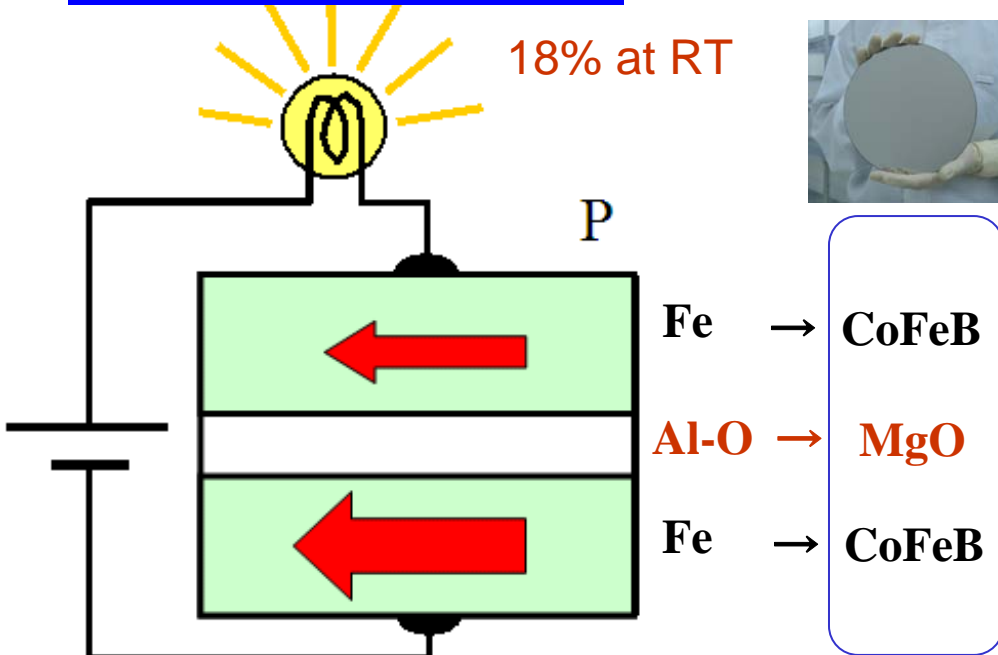
2007年
ノーベル物理学賞

コイルを使用しないで、電氣的に
スピン(磁石)の向きを読めた。

磁気トンネル接合 (MTJ)のトンネル磁気抵抗 (TMR)効果

1994 室温TMR効果

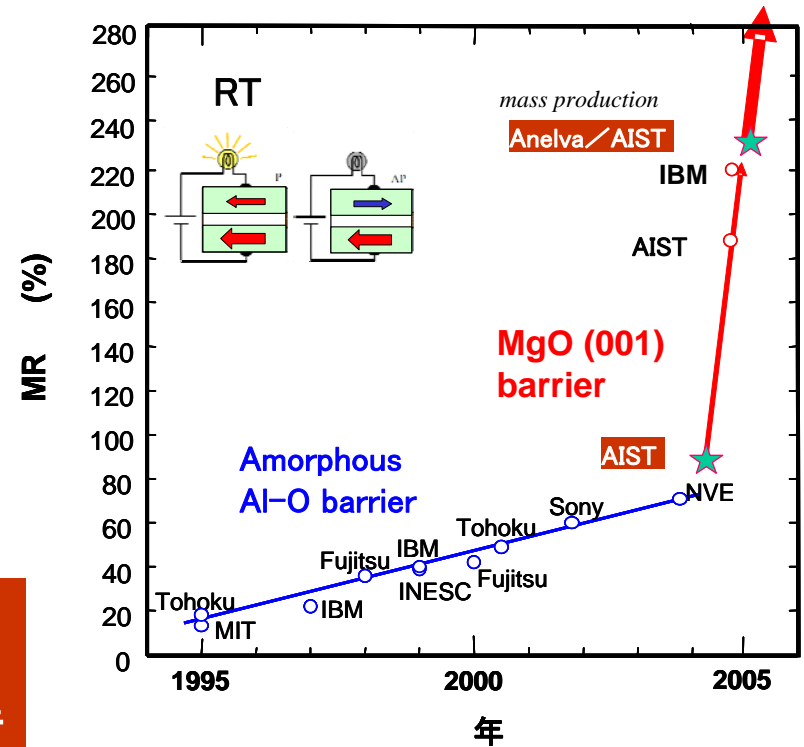
宮崎 (東北大)
Moodera (MIT)



MTJの
世界標準

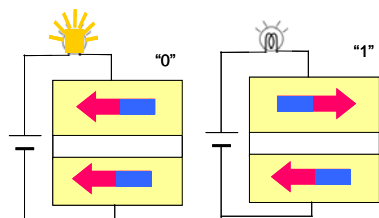
2004 MgO-MTJ

湯浅 (産総研)
Parkin (IBM)

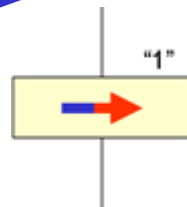


コイルフリーのスピンドロニクス → 電荷情報変換

コイルフリーのスピンドロニクス ← 電荷情報変換



スピンドロニクス → スピントロニクス



1986

1994

2004

2000

2004

GMR効果

室温
TMR効果

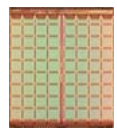
MgO系
TMR効果

スピンドロニクス
磁化反転

電流駆動
磁壁移動



HDDヘッド



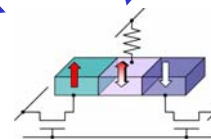
MRAM



スピンドロニクス
RAM
(大容量)

産総研、東芝、
阪大、東北大、
電通大

垂直磁化
TMR素子



磁壁移動RAM
(高速)

NEC、京大、
電通大

垂直磁化
Co/Ni膜

スピンドロニクスRAM

CoFeB/MgO-MTJは市場の標準

スピン流を用いるデバイス:これまでの実績

デバイス



HDDヘッド: 実用化済 (市場規模~数千億円/年)



スピンRAM: 実用化が見えた(市場規模~数兆円/年)

- 応用 : 大きな産業的・社会的インパクトの実績
- 基礎 : 次々と出現する新メカニズム(スピン流)



スピン流を用いて更なる応用デバイス創出を!

HDDヘッド、スピンRAMを超える新デバイスの実現を!
XXシステムに変革をもたらすものを!

スピン流を用いるデバイス:これからは？

次々と出現する新メカニズム
(コイルフリー、量子力学的直接結合)

スピン偏極

スピン注入

スピントルク

スピン注入磁化反転

スピン流駆動磁壁移動

⇒ 更なる高度化と拡がりへの展開

スピンポンピング

スピン蓄積

スピンホール効果

逆スピンホール効果

スピンゼーベック効果

スピン光

⇒ 新規な応用創出への展開

スピン流を用いるデバイスの可能性

POの視点

ワークショップ(2011年8月11日)の話題を中心に

スピン流を用いるデバイスの可能性(例)

主な研究開発課題例

- スピントルク高周波素子
- スピンペルチェ／スピンゼーベック素子
- スピントランジスタ
- スピン光素子

公募は完全にオープン

- 上記の開発の採択を優先させることは無い
- 上記の枠に収まらないものでも、優れた提案は採択する

スピン流を用いる新機能デバイス！？

新規現象

基礎研究ではない！

(1) 実質スピンでなければ出来ない機能を持つデバイス

10年、50年後も重要（どう特性を向上するか？）

◎不揮発性機能：磁気テープ、HDD、MRAM

◎非相反光素子：光アイソレータ

○磁場応答性：磁気センサー

(2) 他の物理現象で実現されている機能をスピンでグレードアップするデバイス

強力な競争相手が存在（既存の特性を超えることが出来るか？）

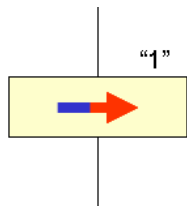
まだ存在しない？

スピン流を用いるデバイスの可能性(例)

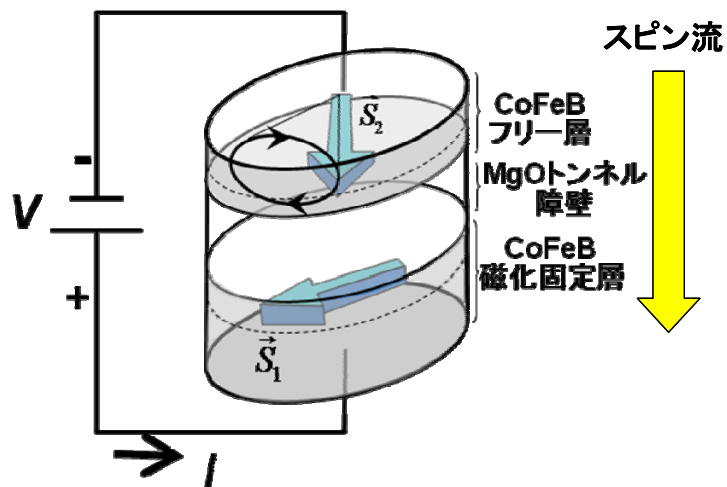
スピントルク高周波素子

スピントルク高周波素子とは

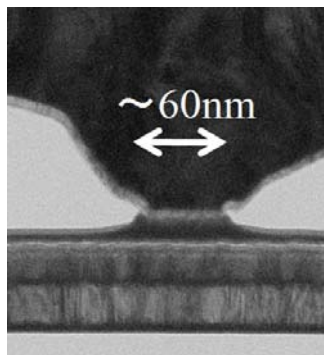
STO (Spin Torque Oscillator)



スピンRAMに使われているMgO-MTJ素子におけるスピン注入磁化反転技術の発展



DC電流を流すだけで、磁化がGHzの周波数で回り続ける条件がある



マイクロ波の発振、検波、増幅ができる

ナノスケールサイズの高周波素子！
(共振回路は不要)

電流や外部磁場で周波数が可変

鈴木(阪大)のWS資料から

モトローラ、コーネル大、NIST、仏Thales/CNRS、東芝、東北大、阪大、産総研など

ここでの興味：
素子そのものではない。
この素子を用いてどのような革新的応用が拓けるのか？

検出感度は半導体素子を超えた！
発振出力は7年で10万倍向上！
スペクトル純度は3年で100倍向上！

スピントルク高周波素子 : 3次元磁気記録システムは実現可能か？

ストレージ機能: 増え続ける情報量の要求に、HDDシステムが応えることが出来なくなりつつある
(HDD以外のストレージの性能は問題外に低い)

現状のHDDシステム
2次的にビットサイズを縮小



3次元磁気記録システム(大幅なシステム変更)
記録メディア層を複数積層して読み書きする

ストレージの3次元化は、非常に大きなインパクトを持つが、非常に困難で失敗の歴史(例: ホールバーニング)

スピン高周波素子の特長: 極微小(ナノスケール)、電流で周波数可変

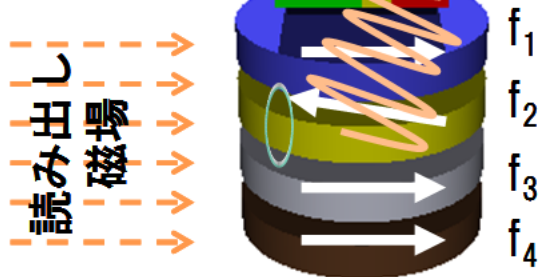


MgO-MTJヘッドは
100nm以下

再生

STOの共鳴吸収の有無を利用

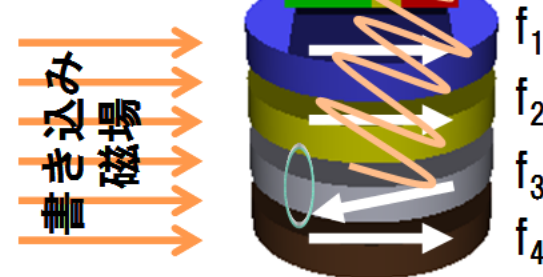
[列選択]
多層媒体に磁場を印加
[層選択]
STOを周波数 f_k で発振



記録

STOによる高周波アシストを利用

[列選択]
多層媒体に磁場を印加
[層選択]
STOを周波数 f_k で発振



HDDを大きく超える
可能性をシステムデモで!

佐藤(東芝)
WS資料より

スピントルク高周波素子 : 単一ラジカルスピンの検出が可能な 超高感度磁場センサーの可能性

スピンマイクロ素子の特長: ナノスケールサイズ、外部磁場で周波数可変

対象物に数10nmまで接近可能

対象物からの磁場による
周波数変調を検出

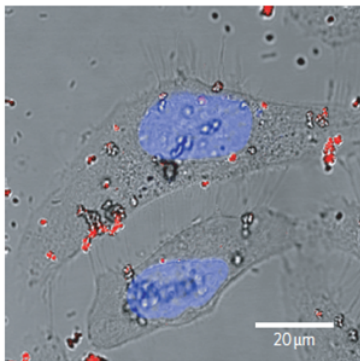
ナノサイズの
磁気ビーズで
修飾された
細菌や
タンパク分子

マイクロ流路

システムデモの実証を!

スピン注入発振型
高感度磁場センサー

単一ラジカルスピンの検出も夢ではない!



スピン流を用いる新機能デバイス！？

新規現象

基礎研究ではない！

(1) 実質スピンでなければ出来ない機能を持つデバイス

10年、50年後も重要（どう特性を向上するか？）

◎不揮発性機能：磁気テープ、HDD、MRAM

◎非相反光素子：光アイソレータ

○磁場応答性：磁気センサー

三次元磁気記録

超高感度磁場センサー

(2) 他の物理現象で実現されている機能をスピンドでグレードアップするデバイス

強力な競争相手が存在（既存の特性を超えることが出来るか？）

スピントルク
高周波素子

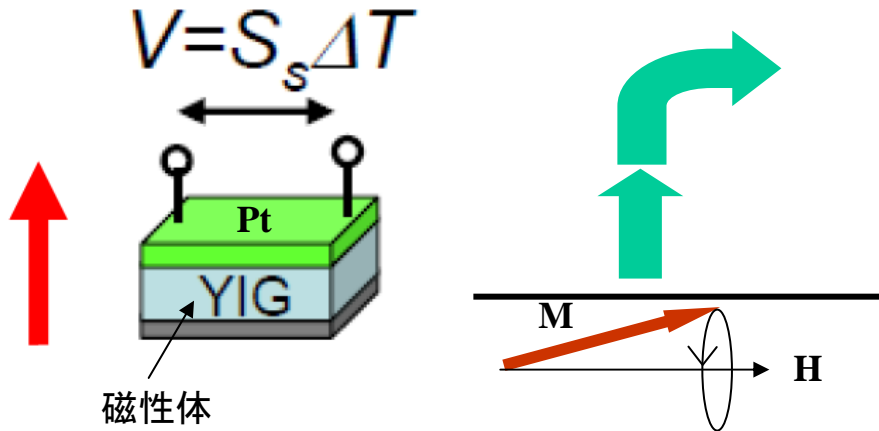
まだ存在しない？

スピン流を用いるデバイスの可能性(例)

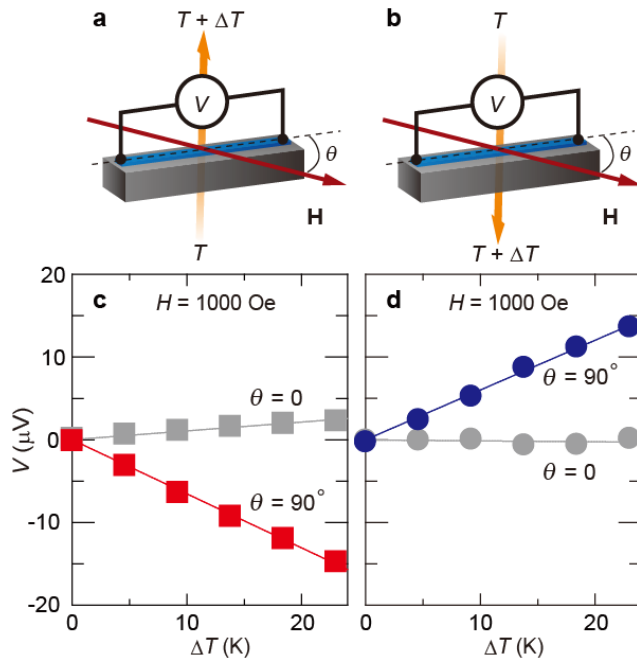
スピン熱デバイス
(ペルチェ/スピンゼーベック素子)

スピン熱デバイスとは

温度勾配



- ③ Ptのスピンの軌道相互作用で電荷の空間的分布が偏り電圧が発生 (逆スピンホール効果)
- ② スピン流がPtの中に流れる (スピンプンピング)
- ① 熱でマグノンが励起される



従来の熱電素子とは異なる動作メカニズム

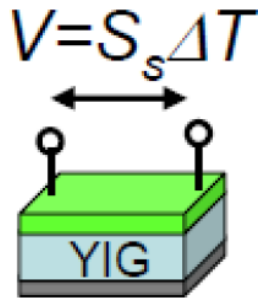
齋藤(東北大)の実験結果

スピン熱デバイス

v.s.

ゼーベック素子

温度勾配



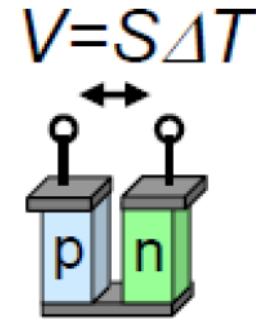
▶ 微細加工が不要

⇒ 低コスト化が期待される

▶ 電気のパスと熱のパスが分離

⇒ 電気と熱の二律背反を
回避できる！？
(性能向上が可能！？)

温度勾配



▶ 微細加工 (p-n接合) が必要

⇒ コストが上昇

▶ 電気のパスと熱のパスが同一

⇒ 電気と熱は二律背反
(性能向上の障壁)

既存素子を超える“発電効率／コスト”が出せるか ？！

スピン流を用いる新機能デバイス！？

新規現象

基礎研究ではない！

(1) 実質スピンでなければ出来ない機能を持つデバイス

10年、50年後も重要（どう特性を向上するか？）

◎不揮発性機能：磁気テープ、HDD、MRAM

◎非相反光素子：光アイソレータ

○磁場応答性：磁気センサー

(2) 他の物理現象で実現されている機能をスピンでグレードアップするデバイス

強力な競争相手が存在（既存の特性を超えることが出来るか？）

まだ存在しない？

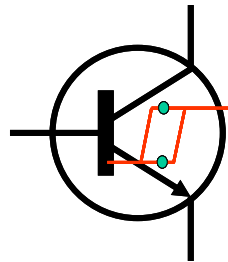
スピン熱デバイス

スピン流を用いるデバイスの可能性(例)

スピントランジスタ

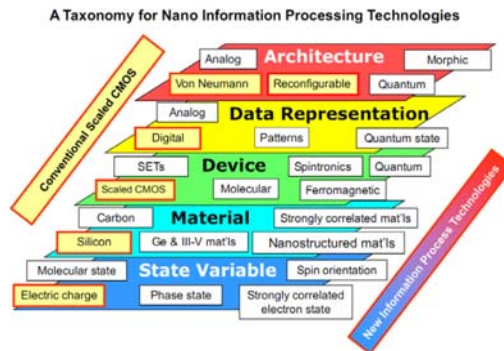
スピントランジスタ開発の二つの目的

(1) 論理回路への不揮発性機能の付与



強磁性体を含むスイッチ素子

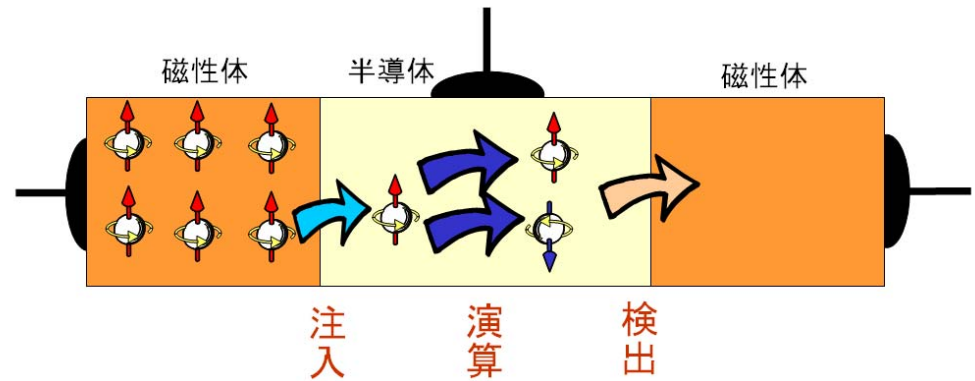
(2) CMOSの限界を超える超低消費電力演算素子



スピン自由度を情報担体と演算素子

スピントランジスタの技術課題

スピン偏極
スピン注入
スピンプンピング
スピン蓄積
スピンホール効果
逆スピンホール効果
スピンゼーベック効果
スピン光



東芝、TDK、インテル、DARPA、NRL、UCLA
阪大、東大、東工大、九州大、東北大、産総研、.....

目的とする機能で既存素子を超える実証を

スピン流を用いる新機能デバイス！？

新規現象

基礎研究ではない！

(1) 実質スピンでなければ出来ない機能を持つデバイス

10年、50年後も重要（どう特性を向上するか？）

◎不揮発性機能：磁気テープ、HDD、MRAM

◎非相反光素子：光アイソレータ

○磁場応答性：磁気センサー

(2) 他の物理現象で実現されている機能をスピンでグレードアップするデバイス

強力な競争相手が存在（既存の特性を超えることが出来るか？）

まだ存在しない？

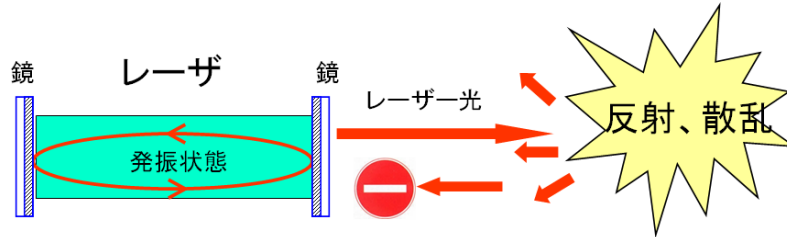
スピントランジスタ

スピン流を用いるデバイスの可能性(例)

スピン光素子

スピノ光素子の二つの目的

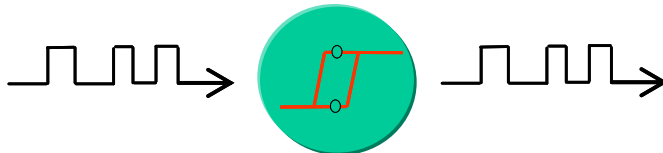
(1) 非相反性機能



半導体集積回路と整合する光アイソレータ

光の進行方向を一方向に限定して
レーザ発振を安定化

(2) 光回路への不揮発性機能の付与



光バッファメモリ

光メモリ機能

目的とする機能の実証を

スピン流を用いる新機能デバイス！？

新規現象

基礎研究ではない！

(1) 実質スピンでなければ出来ない機能を持つデバイス

10年、50年後も重要（どう特性を向上するか？）

◎不揮発性機能：磁気テープ、HDD、MRAM

◎非相反光素子：光アイソレータ

○磁場応答性：磁気センサー

スピン光素子

(2) 他の物理現象で実現されている機能をスピンでグレードアップするデバイス

強力な競争相手が存在（既存の特性を超えることが出来るか？）

まだ存在しない？

スピン流を用いるデバイスの可能性

実施方法

採択

スピン流の多様なデバイスへの応用可能性を実証する優れた課題提案を期待

本日言及した課題は単なる例示です。広く考えてください。

➤ 実現されたときの社会的・産業的なインパクト

➤ マイルストーンと各ステージにおいて実現すべきベンチマーク

具体的かつ定量的なものを期待します。
競合技術との比較も明記してください。

➤ 開発計画を実行しうることを示す実績

ステージIの中間評価はすぐに来ます。

➤ 優れた提案が多い場合には4課題以上の採択もありえる

予算額は公募要領の記載にかかわらず傾斜配分します。
ステージIIでは原則4課題以下に絞り込みます。

➤ 優れた提案が少ない場合には、採択数は4課題以下

中間評価

➤ ステージの移行時には、最終目標実現への道筋を精査

ポイントは応用デバイスの実現可能性です。
そのために必須な成果は基礎的なものであっても評価します。
意味の無いデバイスのデモをしてくださいという意味ではありません。

その他

➤ 各課題の定期的な研究進捗モニターを実施

中間評価とは別です。
モニター役は、POと専門家(他分野、他課題メンバーの一部)を予定。
2~3ヶ月に1回程度。

➤ 必要に応じて、課題間で協力