

# 強磁性金属／半導体ハイブリッド量子スピントロニクスデバイス

研究代表者

大矢 忍 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 准教授



## 1. 研究の背景と達成目標

現在のスピントロニクス分野において、磁気トンネル接合を用いたトンネル磁気抵抗効果の研究が広く行われている。また、実際にそれらを用いた不揮発性メモリなどの低消費電力デバイスが商用化されつつある。しかし、今後、スピントランジスタなどといったより高機能なデバイスを実現していくことを考えると、磁化の向きや電界を利用した電流のスイッチングなどといった機能性を新たに実現していく必要がある。量子サイズ効果はこのような新たな機能性を実現する上で期待される効果のひとつであるが、この効果を取り込んだスピン依存伝導の研究はまだ報告例が少ない。本研究では、半導体と強磁性体薄膜からなる高品質単結晶量子ハイブリッド構造を作製することにより量子サイズ効果をデバイスに取り込み、スピンドバイスの高機能化に向けて、スピン依存伝導信号の更なる増大や新たな機能性を創出することを目標とした。

## 2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

- ・半導体  $p^+Ge(001)$  基板の上に Fe 量子井戸層を有するフルエピタキシャルの  $Co/Fe/MgO/Fe/MgO$  からなる共鳴トンネルダイオードを作製し、共鳴トンネル効果に起因した電流の電圧微分特性における振動現象の観測とトンネル磁気抵抗効果(TMR)の変調に成功した[R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2018)]. キャリア濃度の小さな Ge 基板を介して電流を流すことにより、波動関数の面内波数成分を制限することにより得られた結果であると考えられる。半導体と金属ハイブリッド構造の新たな可能性を示す結果と言える。
- ・金属ベースの磁気トンネル接合をフルエピタキシャルに結晶成長できる相性の良い様々な半導体基板と、それらの間に成長する必要がある酸化物障壁層の候補材料の探索を行った。その中でも、酸化物半導体 Nb ドープ  $SrTiO_3$  基板を用いることにより、単結晶  $\gamma$  アルミナ ( $\gamma-Al_2O_3$ ) 層を介して  $Fe/MgO/Fe$  磁気トンネル接合を作製できることが初めて明らかになった。さらに、 $Fe/MgO/Fe$  構造での報告値としては最大級といえる 219%の TMR 比を室温で得ることに成功した (3.7 K では 366%) [R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, submitted (2020).].

## 3. 研究成果

本研究においては、金属ベース磁気トンネル接合をフルエピタキシャルに結晶成長できる相性の良い半導体基板と、それらの間に成長する必要がある酸化物障壁層の候補材料の探索が最も大きな課題であると言える。この課題を克服しつつ研究を進め、MS1 として「強磁性金属単一量子井戸共鳴トンネルダイオードを作製し共鳴トンネル効果を観測する」ことを課題として掲げ、MS2 として「強磁性金属単一量子井戸共鳴トンネルダイオードにおいて、トンネル磁気抵抗効果(TMR)の共鳴トンネル効果による変調を観測する」という課題を掲げた。材料探索には実際のところかなりの苦戦を強いられ、提案課題が実現できる材料系は、ごく一部の材料に限られていることが分かってきた。探索した材料の中でも、Ge と Fe は格子定数が良く合い、相性が良いことは、かなり初期の段階で明らかになった。この知見をベースに、半導体 Ge 基板を用いて、その上に Fe 量子井戸層を有するフルエピタキシャル

の共鳴トンネルダイオードを作製し、共鳴トンネル効果に起因した電流の電圧微分特性の振動現象を観測することに成功した [図 1 (a)(c)] [R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, Appl. Phys. Lett. (2018)]. もう一つの成果として、互いに格子定数が整合する酸化物半導体 SrTiO<sub>3</sub> と Fe も、ヘテロエピタキシャル成長が可能であることが明らかになってきた。その成果とし、Nb ドープ STO 基板(N 型)上に単結晶の  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層を介して Fe/MgO/Fe 磁気トンネル接合を作製できることが明らかとなった。Fe/ MgO/ Fe 構造での報告値としては世界最大級と言える 219%の大きな TMR 比を室温で得ることに成功した。3.7 K の低温では TMR 比が 366%にも達することが明らかになった [図 1 (b)(d)] [R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, submitted (2020).]

STO 基板上のヘテロ構造では、非常に高い TMR が得られたものの、共鳴トンネル効果を観測することはできなかった。現在、その理由について考察しているところであるが、STO 基板は、*sp* 軌道の電子が伝導を支配する Ge と異なり、*d* 軌道が電子の伝導を支配しており、有効質量が重いことなども原因として挙げられる。基板電極の電子状態についても検討が必要である。

一方で、本研究により、高品質の Fe/MgO/Ge ヘテロ構造を作製できるようになったため、Ge を用いて従来実現の難しかった横型スピンの MOSFET が実現できる可能性が出てきた。電流のスイッチと磁気抵抗を両立できる素子として期待されている。本研究では、大学の施設を駆使して、約 22 nm 程度の極微細なチャネル長を有するスピントランジスタ構造の作製に成功した。引き続き、研究を進めていきたい。

#### 4. 今後の展開

半導体・金属ハイブリッドヘテロ接合を実現する上での基本的な方針や、コヒーレント伝導現象を用いたスピンドバイスの新たな可能性などを示すことができた。半導体をベースとしたコヒーレント輸送スピンドバイスを実現する際に有用な指針となると期待される。

#### 5. 発表実績 (抜粋)

- ・ R. Suzuki, Y. K. Wakabayashi, K. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, "Quantum size effect in a Fe quantum well detected by resonant tunneling carriers injected from a p-type Ge semiconductor electrode", Appl. Phys. Lett. **112**, 152402 (2018).
- ・ R. Suzuki, Y. Tadano, M. Tanaka, and S. Ohya, "Large tunnel magnetoresistance in a fully epitaxial double-barrier magnetic tunnel junction of Fe/ MgO/ Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Nb-doped SrTiO<sub>3</sub>", submitted (2020).
- ・ R. Suzuki, Y. K. Wakabayashi, K. Okamoto, M. Tanaka, and S. Ohya, "Observation of spin-dependent resonant tunneling in an Fe quantum well detected by carriers injected from a p-type Ge semiconductor electrode", 2019 Joint MMM-Intermag, GC-01 (oral), Washington Marriott Wardman Park, Washington D. C., USA, 2019 年 1 月 18 日.
- ・ R. Suzuki, Y. Tadano, M. Tanaka, and S. Ohya, "Large tunnel magnetoresistance in a fully epitaxial Fe/ MgO/ Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Nb:SrTiO<sub>3</sub> double-barrier magnetic tunnel junction", 第 67 回応用物理学会春季学術講演会 12p-A501-6, 上智大学, 2020 年 3 月 12 日.

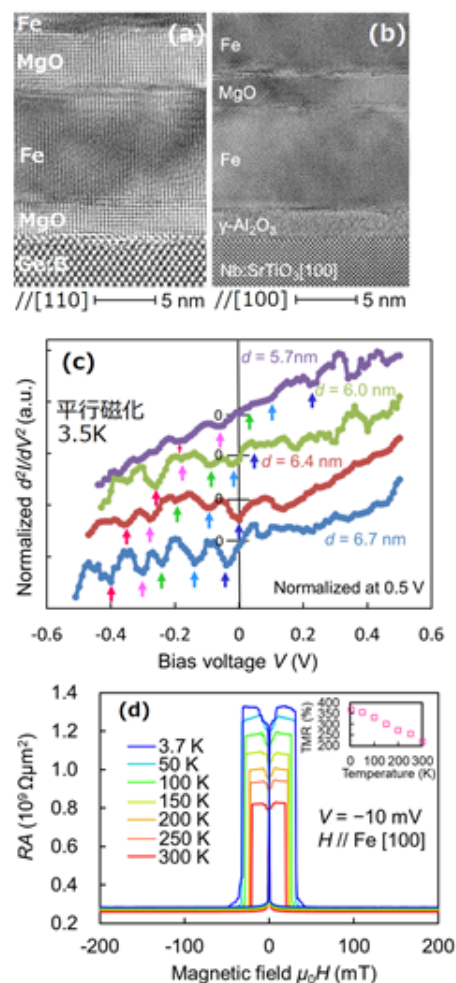


図1 (a) Co/ Fe/ MgO/ Fe / MgO/ p<sup>+</sup>Ge (左)[R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, APL(2018)]と (b) Fe/ MgO/ Fe/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Nb:STO(右)[R. Suzuki, S. Ohya *et al.*, submitted.]の透過型電子顕微鏡写真。(c) (a)の構造で得られた共鳴トンネル効果。(d) (b)の素子で得られた大きな TMR。