

# 熱スピン注入を用いた 半導体二次元電子スピンデバイス技術の構築

大日方 初良\*

## Effective Evaluation of Semiconductor 2D Electron Spin Device by Thermal Spin Injection

Sora OBINATA\*

We demonstrate dynamical thermal spin injection into a Ge/Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub> semiconductor heterostructure at room temperature. A temperature gradient generated by microwave-driven magnetization dynamics in a CoFeB injects spin-polarized electrons into the semiconductor without electrical bias, suppressing band bending at the interface. Ge/n-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub> heterostructures grown by molecular beam epitaxy were fabricated into lateral spin-transport devices, where thermally injected spin currents were detected by the inverse spin Hall effect in Pt. Clear spin-dependent signals were observed under the nonlinear regime of magnetic excitation. These results indicate that dynamical thermal spin injection is an effective approach for investigating spin transport in semiconductor heterostructures.

### 1. 背景

高度情報化社会の進展に伴う半導体デバイスの微細化および高性能化が進む一方、それに伴う消費電力の増大が大きな課題となっている。現在、低消費電力動作の実現に向けて、電子のスピンを半導体に組み込んだ半導体スピンドバイスの開発が進められている。スピンドバイスの実現には強磁性体から半導体への高効率なスピン注入技術に加え、室温下で電子スピンの長距離伝搬可能な半導体チャンネルが必要である。半導体 Ge は室温下での高効率なスピン注入が実証されていることから、その候補として有望である一方で、スピン拡散長は数マイクロメートルが限界であることが既に報告されている<sup>1</sup>。そこで、スピン緩和の抑制が可能な Ge/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ヘテロ構造界面における二次元電子系などの量子系がその候補として期待されている。ここで、二次元電子系を Ge/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ヘテロ界面に実現するためには、電子スピンを界面に拘束するためのバンドオフセットおよびバンドベンディングの適正化をはじめとした構造最適化が極めて重要となる。特に半導体への電気的スピン注入時にはバンドベンディングが不可避であり、バイアス印加によってバンドオフセットが減少するという問題が生じる。

本研究では、二次元電子系や量子井戸などの量子系を実現可能な Ge/Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> ヘテロ構造の最適化に向けて、熱的スピン注入技術の開拓を行った。ここで、熱的スピン注入はスピン注入界面に温度勾配を生成した際に強磁性体から電子スピンの隣接原子層へ注入される現象であり、バイアス印加を伴うバンドオフセット変化の抑制が期待できる。また、本手法では熱源として強磁性体へのマイクロ波照射時に励起される磁気ダイナミクスに起因した発熱現象<sup>2,3</sup>を利用する。この発熱現象は強磁性体内のみに局所的に誘起可能であるため、半導体チャンネルへの熱的影響を抑制できることが期待できる。

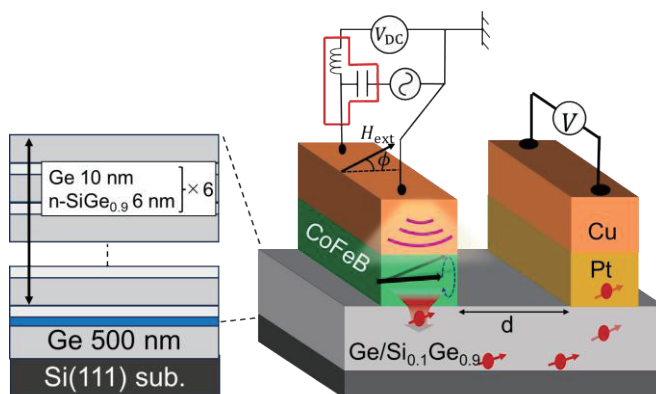


図1 Ge/SiGeヘテロ構造およびデバイス構造の模式図。

### 2. 研究手法

分子線エピタキシー法を用いて、図1左に示すGe/n-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub>ヘテロ構造をSi(111)基板上に成長させた。また、Ge/n-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub>ヘテロ構造界面においては約20 meV程度のバンドオフセットが生じており、理想的にはこのバンドオフセット内に電子が閉じ込められることでスピン緩和の抑制が期待できる。本試料を電子線リソグラフィおよびドライ

2026年2月24日 受理

\* 豊田理研スカラー

大阪大学大学院基礎工学研究科

エッチングによりデバイス構造へ加工したのち、スピン注入電極用強磁性体としてCoFeB(20 nm)を、スピン検出用の電極としてPt(10 nm)をスパッタリング法によって成膜した(図1右)。加えて、スピン信号の高感度検出のためにそれぞれの電極上部にCu電極(100 nm)を作製した<sup>4</sup>。

本デバイスのスピン検出原理は以下のとおりである。まず磁気ダイナミクスに起因した発熱現象によってCoFeB/Ge界面に温度勾配が生じることで電子スピンのGe/n-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub>ヘテロ構造へと熱的に注入される。その後、チャンネル内を減衰しながら伝搬した電子スピンのPt電極へ到達し、逆スピンホール効果によって起電力として検出可能となる。

### 3. 実験結果および考察

室温下でスピン注入電極であるCoFeB上部のCuに4 GHzの高周波電流を印加し、面内方向( $\phi = 45$  deg.)に外部磁場を掃引しながらスピン検出電極であるPt内に生じる起電力を測定した。d=1.0  $\mu\text{m}$ のデバイスで得られたスピン検出信号を図2に示す。高強度マイクロ波照射により、低磁場側の強磁性共鳴(FMR)に加えて、高磁場側において非線形な磁気ダイナミクスの励起に成功した。FMRによって得られた信号はスピン偏極方向に依存しておらずスピン検出信号ではないことが確認された。一方、高磁場側の非線形磁気ダイナミクス励起時のスペクトルは電子スピンの偏極方向に依存していることが分かった。そこで本研究では高磁場側の信号に着目してスピン輸送特性の評価を行った。d=1.0  $\mu\text{m}$ ~4.0  $\mu\text{m}$ の各デバイスにおけるスピン検出信号の強度をプロットした結果を図3(a)に示す。この結果からスピン拡散長を見積もった結果、7  $\mu\text{m}$ 程度となった(図3(b))。本結果は電気的スピン注入手法を用いて報告されているバルクn-Ge( $\sim 0.5$   $\mu\text{m}$ )<sup>5</sup>やn-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub>( $\sim 0.9$   $\mu\text{m}$ )<sup>6</sup>におけるスピン拡散長と比較して長く、量子閉じ込め効果の寄与が期待される。一方で、半導体へのバイアス印加を伴わない熱的スピン注入は本研究が初の試みであるため、量子閉じ込め効果が存在しないバルクn-Geやn-Si<sub>0.1</sub>Ge<sub>0.9</sub>においてもバンドベンディング抑制によるスピン拡散長増大の可能性に加えて、FMR時のスペクトルの起源や非線形磁気ダイナミクス励起時のみスピン検出信号観測された点についても、今後詳細な検討が必要である。

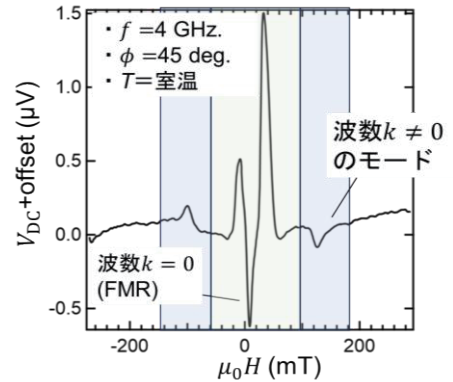


図2 起電力の外部磁場依存性。

### 4. 今後の展望

本研究ではGe/SiGe半導体ヘテロ構造への熱的スピン注入を実施した。半導体へのスピン注入はこれまでバイアス電圧の印加という電気的な手法が主であったが、本研究によって磁気ダイナミクスを用いた熱的スピン注入という新たな可能性を示した。本手法はバンドベンディングの抑制に加えて、電気的スピン注入手法に比べデバイス構造および評価が簡便化することから、スピン輸送特性を持つ構造探索の加速が期待される。一方で、半導体への熱的スピン注入に関しては本研究が初の試みであり、今後はその詳細な注入メカニズムの解明が不可欠である。

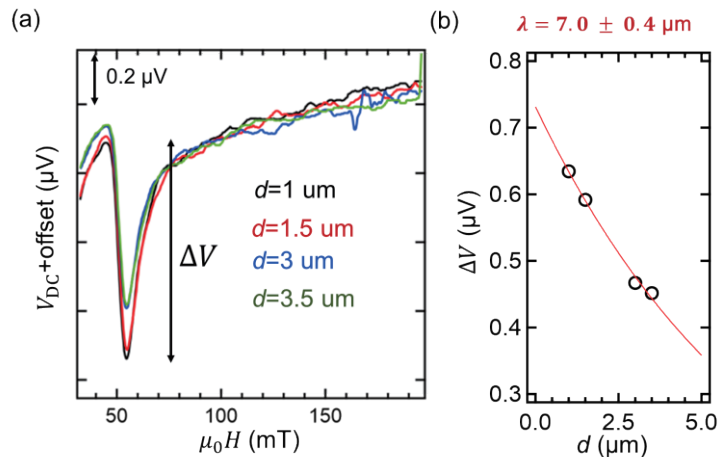


図3 (a) スピン検出信号および、(b) 信号強度の距離依存性。

### REFERENCES

- 1) K. Hamaya, *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (2018) **51** 393001.
- 2) K. Yamanoi, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **107** (2015) 182410.
- 3) S. Obinata, *et al.*, *Sci. Rep.*, **12** (2022) 3467.
- 4) S. Obinata, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **118** (2021) 152401.
- 5) M. Yamada, *et al.*, *Appl. Phys. Express.*, **10** (2017) 093001.
- 6) T. Naito, *et al.*, *Phys. Rev. Appl.*, **18** (2022) 024005.