



TOHOKU UNIVERSITY



新領域創成のための
挑戦研究デュオ
Frontier Research in Duo (FRiD)

ヘリカルスピントロニクス of 学理構築



研究代表者
工学研究科
准教授好田誠



共同研究者
電気通信研究所
助教金井駿

海外研究機関パートナー1
米国シカゴ大学
教授デイヴィッドオシャロム

海外研究機関パートナー2
スイスIBMチューリッヒ研究所
グループリーダージャンサリス

研究の概要 (Project Summary)

本研究は、半導体や磁性体において、空間変調を受けた電子スピン・磁化構造に着目し、そのダイナミクスがもたらす新たな物性を新規不揮発メモリそして次世代量子情報処理に応用する基盤技術を構築する。さらにスピン・磁化空間構造を統合した「ヘリカルスピントロニクス」と呼ばれる新たな学理構築を目指す。このヘリカルスピントロニクス創成に向け、半導体・磁性体の異なる専門を有する若手研究者2名(好田・金井)と2名の研究協力者(海外機関)で挑む。海外機関は、どちらも研究代表者・研究分担者が過去に滞在し共同研究を展開している、スピントロニクスと量子情報の世界的トップランナーであるウェリントン大学およびシカゴ大学と共に行う。

By focusing on spatial structure on electron spins as well as local magnetic moments in nano scale, we will investigate the fundamental technologies for next-generation non-volatile memories and quantum information processing, based on the dynamics of spatial spin/magnetic structures. By understanding the physics of spatial spin/magnetic structures both in semiconductors and ferromagnetic metals, we will establish new field so called "Helical-Spintronics".

We will tackle this new field of Helical-Spintronics with two young scientist (Kohda/Kanai) and two collaborators in overseas who are in the front runners in the field of Spintronics and Quantum information technology.

スピンを利用した量子情報・磁化制御の根本的課題

量子情報処理

不揮発メモリ

↑ ↓ ← 位相制御 → ↓ ↑

スピン緩和で情報消失
外乱に対し脆弱
大規模化が困難

磁化反転

半導体メモリと比較し
書き換えエネルギー大
更なる省電力化が必要

半導体

磁性体

スピン・磁化の空間構造を用いて課題解決

ヘリカルスピン波

スピン緩和の抑制
外乱耐性のある量子ビット

ノンコリニア
反強磁性体

高感度磁化検出
超省電力磁化反転

次世代量子情報・不揮発メモリの基盤技術確立

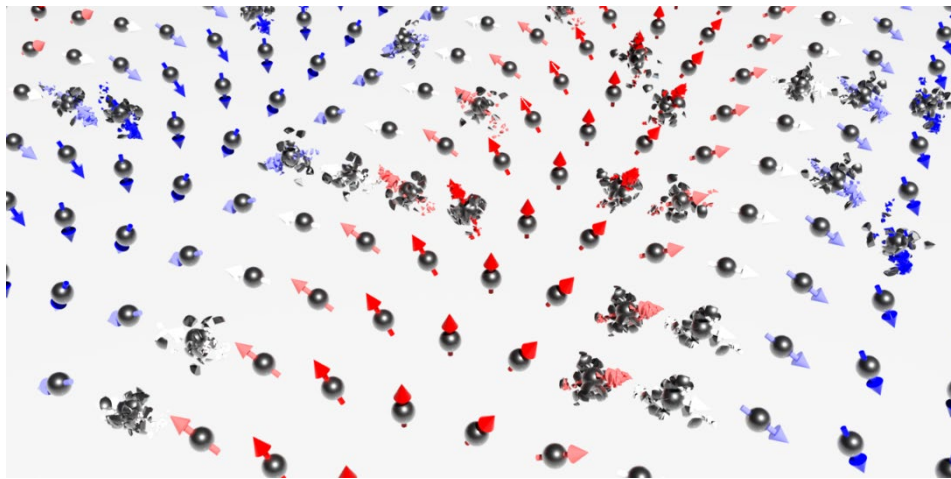
新学問領域ヘリカルスピントロニクス of 学理構築

ヘリカルスピントロニクス of 学理構築

2020年度のトピック (Topic for FY2020)

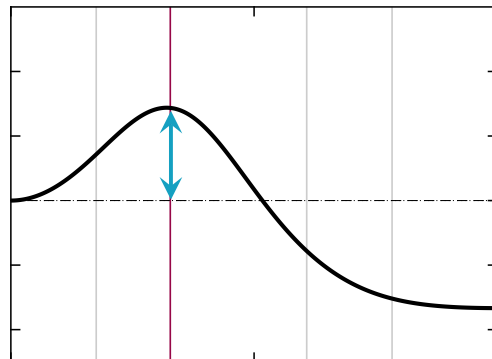
半導体における長寿命電子スピン波の発見

(D. Iizasa *et al.*, Physical Review B 101, 245417 (2020). 2020年6月16日 プレスリリース)



[001] [115] [225] [111] [221] [110]

従来の結晶方向である[001]を
基準としたスピン波持続時間



スピン波の持続時間の結晶方向依存性。従来すでに調査されてきた[001], [111], [110]方向を遥かに超える[225]結晶方向におけるスピン波持続時間。約30%もの長寿命化に成功。

電子がもつ磁石の性質であるスピンを利用した次世代スピントランジスタは、従来のトランジスタと比較し、消費電力の大幅低減が期待されています。この時、スピンの向きを揃え一斉回転しながら空間伝搬するスピン波は、半導体中のスピン回転制御やスピン情報輸送手段として必要不可欠です。

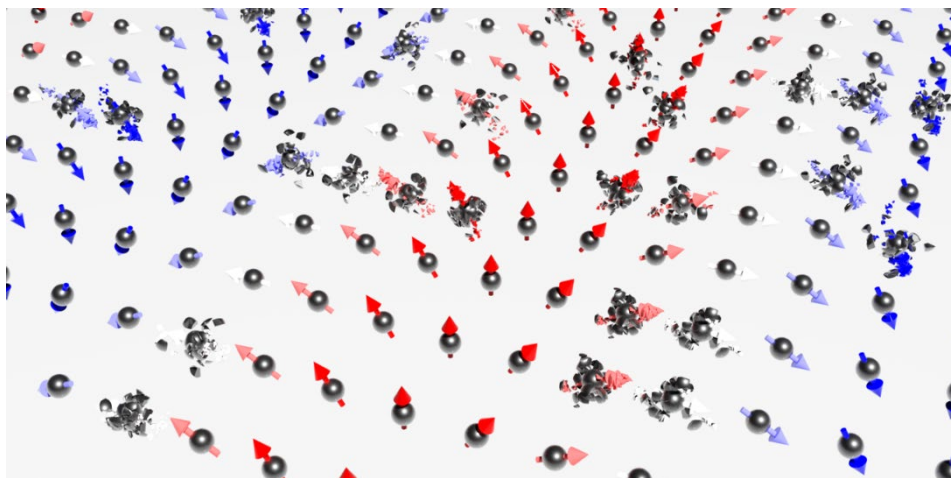
新たな情報担体として期待されている半導体のスピン波が、従来よりも長時間持続できる結晶方向を発見しました。本研究ではスピン波が伝搬する結晶方向を適切に制御し、内部磁場の影響が最も抑制できる結晶方向を理論的に明らかにしました。その結果、従来と比較しスピン波が30%も長寿命化することを突き止めました。

ヘリカルスピントロニクス of 学理構築

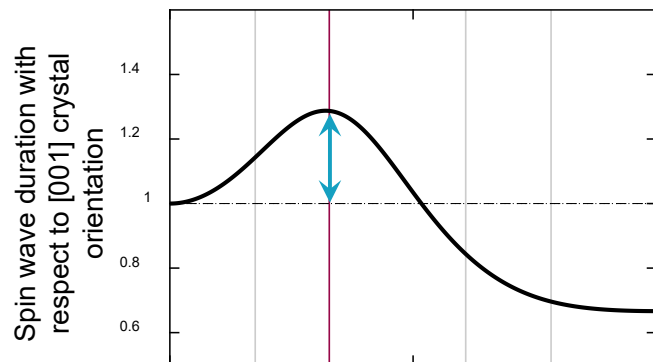
2020年度のトピック (Topic for FY2020)

Discovery of long-lived electron spin waves in semiconductors

(D. Iizasa *et al.*, Physical Review B 101, 245417 (2020). 2020/06/16 Press release)



[001] [115] [225] [111] [221] [110]



Crystal direction dependence of spin wave duration. The spin wave duration in the [225] crystal direction is much longer than that in the [001], [111], and [110] directions, which have already been investigated. Succeeded in extending the lifetime by about 30%.

Next-generation spin transistors, which utilize the spin of electrons, are expected to significantly reduce power consumption compared to conventional transistors. At this time, spin waves, which propagate in space while the spins are aligned and rotating in unison, are indispensable for controlling spin rotation and transporting spin information in semiconductors. We have discovered a crystal direction in which spin waves can be sustained for a longer period of time than in conventional semiconductors, which are expected to be a new information carrier. In this study, the crystal direction in which the spin waves propagate was appropriately controlled, and the crystal direction in which the effect of the internal magnetic field is most suppressed was theoretically clarified. As a result, it was found that the lifetime of spin waves was extended by 30% compared to the conventional method.



TOHOKU UNIVERSITY



新領域創成のための
挑戦研究デュオ
Frontier Research in Duo (FRiD)

ヘリカルスピントロニクス of 学理構築

2020年度のトピック (Topic for FY2020)

電波新聞 2020年6月19日9面

日刊工業新聞 2020年8月6日

長寿命なスピンの波発見

東北大 超省電力デバイス実現へ

東北大学大学院工学研究科・高等研究機構新領域創成部の好田誠准教授らの研究グループは、ニュージラランドのヴィクトリア大学ウエリントンと共同で、次世代の情報担体として期待されている半導体の「スピン波」が、従来よりも長時間持続できる結晶方向を発見した。これによる。その際に、スピ

ン波の長寿命化は半導体や量子情報処理において不可欠とされている。研究グループではスピン波が伝搬する結晶方向を適切に制御し、内部磁場の影響を最も抑制できる結晶方向を理論的に解明。この結果、従来と比較してスピンの寿命が30%も長くなることを突き止めた。

が向きをそろえて一斉に回転しながら空間を伝搬するスピン波が重要な役割を担う。今回、スピン波が伝搬する結晶方向を適切に制御し、内部磁場の影響が最も抑制できる結晶方向を理論的に明らかにした。

これまで研究されてこなかった結晶方向でスピン波が最も安定したという。人工知能(AI)やIoT(モノのインターネット)、量子コンピュータに必要と超省電力デバイスとして、実用に向けた研究の発展を見込む。

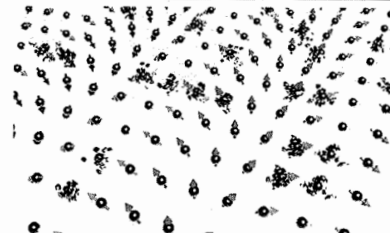
米物理学会誌フィジカル・レビューBに掲載され、注目論文に選ばれた。

これまで研究されてこなかった結晶方向でスピン波が最も安定したという。

半導体の長寿命スピン波発見 超省電力素子の用途を想定

東北大学大学院工学研究科・好田誠准教授らの研究グループは、ビクトリア大学(ニュージラランド・ウエリントン)と協力して、半導体のスピン波が従来よりも長時間持続できる結晶方向を発見した。

スピン波は、電子が持つ磁石の性質であるスピンの向きを回転させる現象が、その向きを回転させながら空間を伝搬する現象



スピン波のイメージ(電子スピンの向きが回転しながら秩序よく伝搬されていく)

研究グループではスピン波が伝搬する結晶方向を適切に制御し、内部磁場の影響を最も抑制できる結晶方向を理論的に解明。この結果、従来と比較してスピンの寿命が30%も長くなることを突き止めた。

はじめとする半導体を20ナノメートルの薄さにし、電子の運動方向を3次元から2次元へ制限した構造を考案することで、現れるスピン波の持続時間を調査した。

研究グループではAI(人工知能)やIoT、量子コンピュータに必要な超省電力素子の用途を想定している。

D. Iizasa, M. K et al., PRB 101, 245417 (2020)



TOHOKU UNIVERSITY



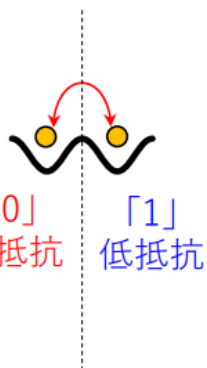
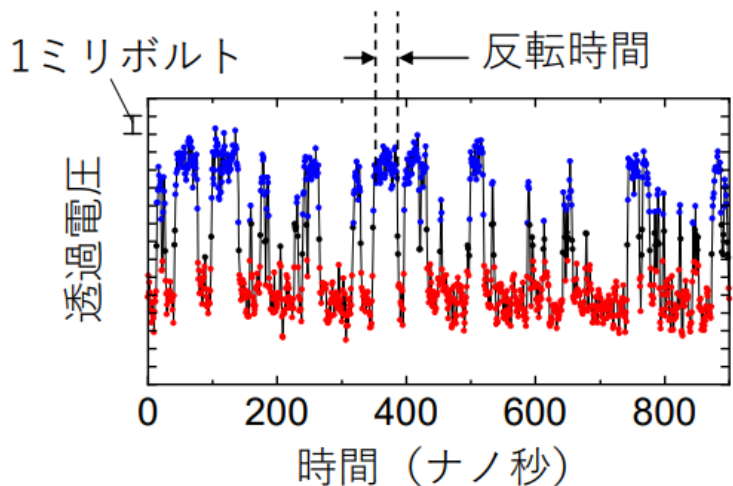
新領域創成のための
挑戦研究デュオ
Frontier Research in Duo (FRiD)

ヘリカルスピントロニクス of 学理構築

2020年度のトピック (Topic for FY2020)

スピントロニクス疑似量子ビットを従来比 100 倍超に高速化

(S. Kanai *et al.*, Physical Review B **103**, 094423 (2021). K. Hayakawa *et al.*, Physical Review Letters **126**, 117202 (2021). (連携論文) 2021年3月18日プレスリリース)



状態遷移を実時間測定した様子。ビットの「0」状態(高抵抗)と「1」状態(低抵抗)の間をナノ秒オーダーで遷移する素子が示され、その高速化の起源と素子設計指針を理論的に明らかにした。

「量子コンピューター」や「確率論的コンピューター」など、「不確定性」や「確率性」を積極的に利用した従来にないコンピューターが注目を集めており、これらを実現するための、電子の持つ電気的性質と磁氣的性質(スピン)の同時利用に立脚する「スピントロニクス」技術の活用が有望視されています。

スピントロニクス技術を用いた疑似量子ビット(確率ビット:Pビット)素子を、1秒間に1億回(従来比100倍)動作させるための重要技術を開発すると共に、これまで着目されてこなかった動的磁化状態の「エントロピー」を考慮することでその物理的起源が説明されることを示しました。本成果は、確率論的コンピューターの研究開発を加速するものです。加えて、「ゆらぎの定理」などの非平衡熱統計物理学の新概念とスピントロニクスを繋ぐ革新的な手法を提供することが期待されます。

ヘリカルスピントロニクスの学理構築

2020年度のトピック (Topic for FY2020)

Demonstrating the World's Fastest Spintronics p-bit

(S. Kanai *et al.*, Physical Review B **103**, 094423 (2021). K. Hayakawa *et al.*, Physical Review Letters **126**, 117202 (2021). (Joint papers) 2021/3/18 press release)

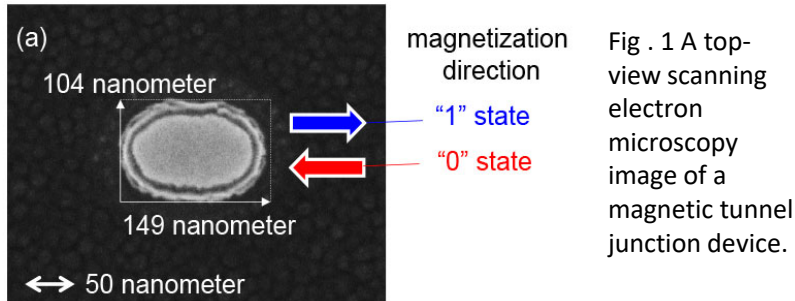


Fig. 1 A top-view scanning electron microscopy image of a magnetic tunnel junction device.

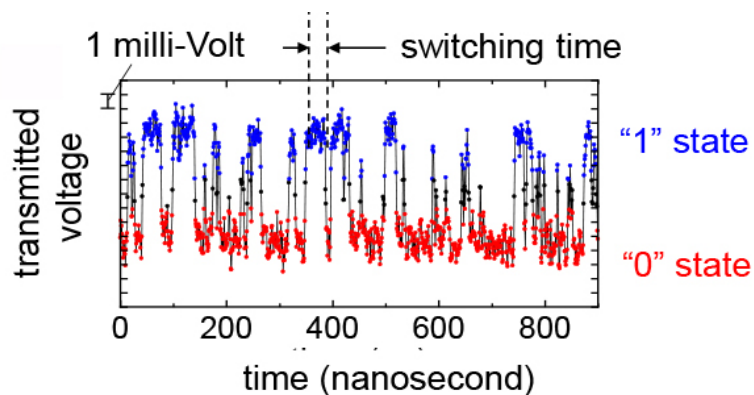


Fig. 2 Real time measured transmitted voltage signal which reflects the magnetization state as well as bit state. Relaxation time, defined as a switching time averaging over 100 million times a second, was observed.

The late physicist R.P. Feynman envisioned a probabilistic computer: a computer that is capable of dealing with probabilities at scale to enable efficient computing. We have, for the first time, developed the technology for the nanosecond operation of the spintronics-based probabilistic bit (p-bit) by a nanoscale MTJ device with an in-plane magnetic easy axis (Fig 1). The magnetization direction updates every 8 nanoseconds on average - 100 times faster than the previous world record (Fig 2). The developed MTJ is compatible with current semiconductor back-end-of-line processes and shows substantial promise for the future realization of high-performance probabilistic computers. Also, our theoretical framework of magnetization dynamics including entropy also has broad scientific implication, ultimately showing the potential of spintronics to contribute to debatable issues in statistical physics.

2021年4月9日（金） 科学新聞 6面

スピントロニクス疑似量子ビット 従来比100倍に高速化

東北大通研

東北大学電気通信研究所の金井駿助教、早川佳祐大学院生、大野英男教授、深見俊輔教授らの研究グループは、スピントロニクス技術を用いた疑似量子ビット（確率ビット：Pビット）素子を、従来比100倍である1秒間に1億回動作させるための重要技術を開発。これにより、これまで着目されてこなかった動的磁化状態のエントロピー（乱雑さを表す物理量）を考慮することでその物理的起源が説明できることを明らかにした。

動的磁化状態のエントロピー考慮

東北大学は、磁気トンネル接合素子などスピントロニクス技術に関する研究を行い、超微細電流半導体メモリの実用化などに貢献してきた。2019年には、疑似量子ビットで機能する磁気トンネル接合素子を開発し、因数分解の原理実証に成功した。ただ、従来のメモリ応用とは異なり、疑似量子ビットの性能向上のためには、磁気トンネル接合素子の情報における「不安定性」を極める必要がある。設計指針を明らかにする物理的な理解の構築が不可欠である。

研究グループは、磁性統計物理学に新しい考えを導入することで、高性能な疑似量子ビットを実現するための磁気トンネル接合素子の設計指針を明らかにし、それを実証した。同研究所附属ナノスケール実験施設を利用して、内面磁化容易軸を持つ磁気トンネル接合素子を製作し、これまでの不安定素子の世界最速記録

(1000ナノ秒)を100倍更新し、秒間1億回以上の状態のゆらぎを制御することができた。

また、観測されたナノ秒での状態遷移の挙動を数値シミュレーションにより再現した。ある時刻で確定していた状態は、時間経過とともに徐々に状態の情報が不確かになり、最終的に状態を推定できなくなる。これが素子の「物忘れ」に相当する。この物忘れは、不揮発記憶素子では致命的な欠陥となる一方、Pビットでは重要な駆動原理となる。言い換えれば、物忘れとは素子の乱雑さであるエントロピーの増大とみなすことができる。

研究グループは、エントロピーが動的に変化する様子を理論計算により調べ、エントロピーの増大速度に従う方程式を導き出した。この方程式から、内面磁化容易軸を持つ磁性体において垂直方向の磁気異方性の絶対値が大きければエントロピーが増大し、物忘れが高速に進むことを明らかにした。

金井助教の話「今回用いた素子は、メモリとして実用化されている磁気トンネル接合と同じ材料で構成されていることから、比較的スムーズに産業化に移行できると考えています。今後は、より大規模で高速に動作させるための材料・構造上の工夫を取り入れ、その限界に挑戦したい」

■磁化容易軸 磁化のN極/S極の方向が変化した際に内部エネルギーが変化する現象を磁気異方性と呼び、磁化の向きやすい方向を磁化容易軸と呼ぶ。今回の研究では、内面磁化容易軸を持つ磁気トンネル接合で緩和時間が短くなることで物理的に予想され、それを実験的に実証した。

S. Kanai *et al.*, *Physical Review B* **103**, 094423 (2021).
K. Hayakawa *et al.*, *Physical Review Letters* **126**, 117202 (2021). (連携論文)



ヘリカルスピントロニクスの学理構築

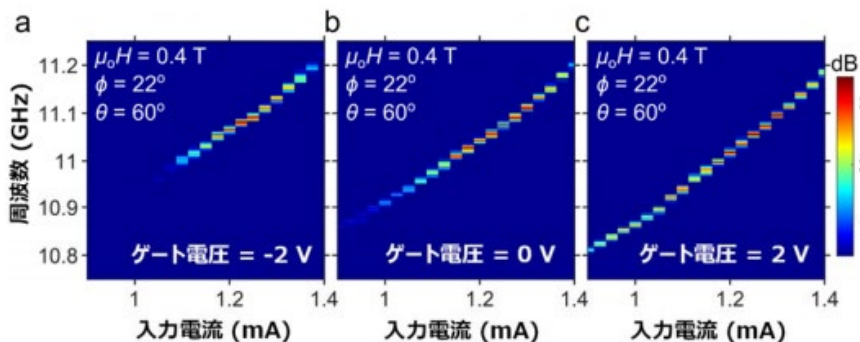
2020年度のトピック (Topic for FY2020)

スピントロニクス人工ニューロン素子の超省エネ制御手法を開発

(H. Fulara *et al.*, Nature Communications **11**, 4006 (2020). 2020年8月17日 プレスリリース)

神経回路を模したシステム（人工知能ハードウェア）を構築し、脳に迫るエネルギー効率で高度な情報処理を実現するための研究開発が盛んに行われています。高効率な人工知能ハードウェアを実現する上で、電子の持つ電氣的性質と磁氣的性質（スピン）の同時利用に立脚するスピントロニクス技術の活用が有望視されています。

ヨーテボリ大との共同研究により、人工知能ハードウェアへの応用が期待されるスピントロニクス技術を用いた人工ニューロン素子の特性を低消費電力で個別に制御できる重要技術を開発しました。今回開発された技術は音声や動画像の認識、健康状態のモニタリング、限られた情報からの未来の予測などを得意とするリザーバーコンピュータなどへの応用が見込まれ、「ニューノーマル」時代に向けて今後益々の発展が期待されます。



スピントロニクス発振素子の発振特性のゲート電圧依存性。黄色や赤色の領域は、その電流、その周波数において強い発振が起こっていることを意味する。a,b,cではそれぞれ印加するゲート電圧が異なっている。ゲート電圧によって発振が起こる領域が異なっていることが分かる。詳細な解析から、各電流で発振が起こる周波数、発振している領域の幅（線幅）もゲート電圧によって変化していることが分かった。



TOHOKU
UNIVERSITY



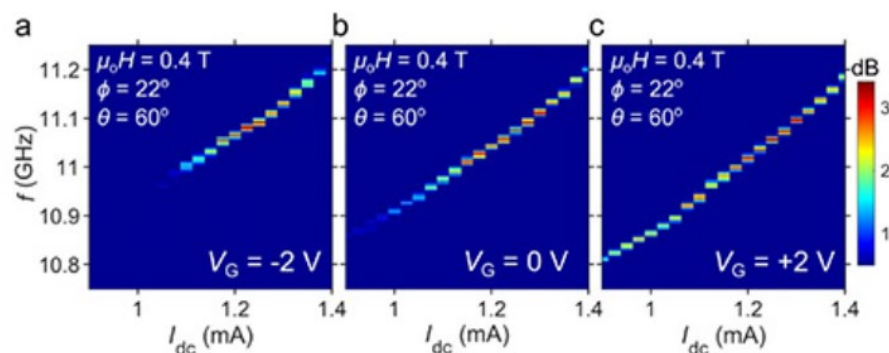
新領域創成のための
挑戦研究デュオ
Frontier Research in Duo (FRiD)

ヘリカルスピントロニクスの学理構築

2020年度のトピック (Topic for FY2020)

Energy-Efficient Tuning of Spintronic Neurons

(H. Fulara *et al.*, Nature Communications **11**, 4006 (2020). 2020/08/17 Press release)



Experimental result of oscillation property under various gate voltages. Red and yellow regions mean a strong oscillation taking place. One can see that the oscillation property changes with the gate voltage.

The human brain efficiently executes highly sophisticated tasks, such as image and speech recognition, with an exceptionally lower energy budget than today's computers can. The development of energy-efficient and tunable artificial neurons capable of emulating brain-inspired processes has, therefore, been a major research goal for decades. With researchers at the University of Gothenburg, we have reported on an important experimental advance in this direction; demonstrating a novel voltage-controlled spintronic microwave oscillator capable of closely imitating the non-linear oscillatory neural networks of the human brain. Using an effect called voltage-controlled magnetic anisotropy, the magnetic and magnetodynamic properties of CoFeB ferromagnet, consisting of a few atomic layers, can be directly controlled to modify the microwave frequency, amplitude, damping, and, thus, the threshold current of the spin Hall nano-oscillators.