

学位論文の審査結果の要旨

高密度・大容量・高速・低消費電力の情報ストレージ・デバイスは、ユビキタスIT化社会では重要な役割を果たしており、将来もその役割は変わることが無い。

磁気スキルミオンは、ナノスケール薄膜中の原子スピンの特殊な渦巻き状態であり、整数のトポロジカル量子数によってその振舞が説明される。その安定性及びそのダイナミクスはトポロジカル特性に依存する。また磁気スキルミオンは数ナノメートルと極めて小さく、しかも不揮発特性を持つ。磁気スキルミオンは、駆動・生成・消滅が可能で、情報分野の“0”と“1”の物理表現として書込み、読み出す性能を持つ、論理演算素子・超低消費電力超高密度メモリ素子として期待されている。

本論文はマイクロ・マグネティックス・シミュレーションと呼ばれるシミュレーション手法を用いて、磁性細線などナノ構造中に、スピン偏極電流、スピン波による磁気スキルミオンの制御、生成、並びにそのダイナミクスを議論している。更に、磁気スキルミオンを情報ストレージ・デバイスや高速論理素子への応用に関して、具体的に提案、議論している。

論文では、電流駆動磁気スキルミオンの物理本質であるスピントランスファートルクの効率に着目し、Dzyaloshinskii-Moriya交換結合作用、フラストレーション交換結合作用、反強磁性交換結合作用など具体的な交換結合作用とその磁気スキルミオンの安定性、ダイナミクスを明らかにした。

次世代高密度メモリの一つの有力な候補として、レーストラック型メモリを提案されている。しかしながら、電流駆動磁壁移動を基本としており、駆動電流密度は非常に高いため、電流によるジュール熱損失を無視できない。本論文では、電圧による磁気スキルミオン駆動手法を提案し、電圧により磁気スキルミオンの制御をシミュレーションで解明している。電圧駆動の場合は、ジュール熱損失を

限界まで低減でき、極めて低消費電力な駆動方法と考えられる。

磁気特性を用いた記録媒体の大きなデメリットは高密度につれて記録ビットが小さくなり磁氣的安定性が乏しくなることである。本論文では、反強磁性磁気スキルミオンの手法を提案している。反強磁性結合では、上向き、下向きのスピンのつりあうことによって、外部磁界の影響などが極めて小さくなり、ビットサイズが小さくなくても安定的に存在できる。従って、反強磁性スキルミオンは現在一般の2次元のメモリを3次元的に集積可能になる。論文では、反強磁性磁気スキルミオンの具体的な制御方法及びそのメリットを説明している。

以上より、本論文はスピントロニクス分野において独創的で重要な知見を与えており、学位論文審査委員会全員一致で、Xichao Zhang氏提出した論文は大学院修了者と同等の学力を有し、学位論文として認められる内容であり、学位論文審査合格と判定した。

公表主要論文名

- Xichao Zhang, Jing Xia, Yan Zhou, Xiaoxi Liu, Han Zhang, Motohiko Ezawa, Skymion dynamics in a frustrated ferromagnetic film and current-induced helicity locking-unlocking transition, Nature Communications, Vol. 8, Article No. 1717, 10 pages, DOI: 10.1038/s41467-017-01785-w (2017年11月発行に掲載)
- Xichao Zhang, Jing Xia, Yan Zhou, Xiaoxi Liu, Han Zhang, Motohiko Ezawa, Skymion dynamics in a frustrated ferromagnetic film and current-induced helicity locking-unlocking transition, Nature Communications, Vol. 8, Article No. 1717, 10 pages, DOI: 10.1038/s41467-017-01785-w (2017年11月発行に掲載)
- Xichao Zhang, Jing Xia, G. P. Zhao, Xiaoxi Liu, Yan Zhou, Magnetic skyrmion transport in a nanotrack with spatially varying damping and non-adiabatic torque, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 3, Article No. 1500206, 6 pages, DOI: 10.1109/TMAG.2016.2641384 (2016年12月発行に掲載)
- Xichao Zhang, Jing Xia, Yan Zhou, Daowei Wang, Xiaoxi Liu, Weisheng Zhao, Motohiko Ezawa, Control and manipulation of a magnetic skyrmionium in nanostructures, Physical Review B, Vol. 94, No. 9, Article N

- o. 094420, 13 pages, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.094420 (2016年9月発行に掲載)
- Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Yan Zhou, Thermally stable magnetic skyrmions in multilayer synthetic antiferromagnetic racetracks, *Physical Review B*, Vol. 94, No. 6, Article No. 064406, 11 pages, DOI: 10.1103/PhysRevB.94.064406 (2016年8月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, Antiferromagnetic skyrmion: stability, creation and manipulation, *Scientific Reports*, Vol. 6, Article No. 24795, 8 pages, DOI: 10.1038/srep24795 (2016年4月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, High-topological-number skyrmion and topologically protected dissipative structure, *Physical Review B*, Vol. 93, No. 2, Article No. 024415, 10 pages, DOI: 10.1103/PhysRevB.93.024415 (2016年1月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, Magnetic bilayer-skyrmions without skyrmion Hall effect, *Nature Communications*, Vol. 7, Article No. 10293, 7 pages, DOI: 10.1038/ncomms10293 (2016年1月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Yan Zhou, Motohiko Ezawa, G. P. Zhao, Weisheng Zhao, Magnetic skyrmion transistor: skyrmion motion in a voltage-gated nanotrack, *Scientific Reports*, Vol. 5, Article No. 11369, 8 pages, DOI: 10.1038/srep11369 (2015年6月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Dun Xiao, G. P. Zhao, Yaowen Liu, Yan Zhou, All-magnetic control of skyrmions in nanowires by a spin wave, *Nanotechnology*, Vol. 26, Article No. 225701, 8 pages, DOI: 10.1088/0957-4484/26/22/225701 (2015年5月発行に掲載)
 - Xichao Zhang, Motohiko Ezawa, Yan Zhou, Magnetic skyrmion logic gates: conversion, duplication and merging of skyrmions, *Scientific Reports*, Vol. 5, Article No. 9400, 8 pages, DOI: 10.1038/srep09400 (2015年3月発行に掲載)