

Title	ダイヤモンド中のNV中心を用いた熱マグノンの計測
Author(s)	Prananto, Dwi
Citation	
Issue Date	2019-06
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/10119/16066
Rights	
Description	Supervisor : 安 東秀, 先端科学技術研究科, 博士

氏名	Dwi Prananto		
学位の種類	博士(マテリアルサイエンス)		
学位記番号	博材第 471 号		
学位授与年月日	令和元年 6 月 24 日		
論文題目	Detection of Thermal Magnon via Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond		
論文審査委員	主査 安 東秀	北陸先端科学技術大学院大学	准教授
	水田 博	同	教授
	小矢野 幹夫	同	教授
	赤堀 誠志	同	准教授
	阿部 英介	理化学研究所	
		創発物性科学研究センターユニットリーダー	

論文の内容の要旨

Current of thermally induced magnon has recently been considered as a medium for transporting information with low energy dissipation. It has been demonstrated that thermal magnon can transmit information as far as 40 μm at room temperature and more than 100 μm at 23 K. In the past few years research has been focused on understanding the nature of thermal magnon transport and how it interacts with environment. Several researches have demonstrated that thermal magnon can transfer its angular momentum to other spin system, a phenomenon known as thermal spin transfer torque.

Recently, electron spins ($S = 1$) associated to nitrogen-vacancy (NV) defect center in diamond have attracted a great attention from spintronics research community due to its ability to sense the dynamics of spin system with exceptional sensitivity. NV center in diamond is well known to have excellent characteristics compared to other spin-based sensor, among them are ambient temperature working condition, long coherence time, and wide band (DC to GHz) magnetometry capability. It has been demonstrated recently that electron spins associated to diamond with NV center can be well coupled with magnetostatic spin waves due to the closeness of their energy, which is within several GHz regime. Detection of thermal magnon with the same technique possesses additional challenge as its energy, defined by $k_B T$, is far above the NV spin energy.

In this dissertation we explore an unprecedented technique in the detection of thermal magnon using electron spins in diamond with NV centers as quantum sensors. We employ a diamond beam ($2.5 \times 0.1 \times 0.1 \text{ mm}^3$) with (110) crystal orientation hosting a layer of NV spin ensemble at the depth of about 30 nm beneath the surface of the diamond. As a material for the investigation of thermal magnon we use yttrium iron garnet (YIG) ($\text{Y}_5\text{Fe}_{12}\text{O}_3$) which is well known as an ideal test bed for studying magnon transport due to its electrically-insulating characteristic. Thermal magnon is generated by introducing non-equilibrium temperature condition in YIG. We make use of magnetostatic surface spin wave (MSSW), generated in

YIG by a coherent microwave source, as a mediator for the detection of the thermal magnon.

A home-build scanning confocal microscope, equipped with a high-speed multichannel pulse generator, is employed to optically manipulate and detect the states of NV spins under the influence of thermal magnon and MSSW. We found that the dynamics of MSSW is modulated under the alteration of temperature gradient in YIG. This modulation is observed as a change in the contrast of the optically detected magnetic resonance (ODMR) spectrum of the NV spins as temperature gradient is applied to the YIG. Moreover, we found that the strength of oscillating magnetic field generated by the MSSW which drives the NV spins to their two-level transition ($m_s = 0 \leftrightarrow 1$), or Rabi oscillation, is enhanced or diminished with the variation of temperature gradient applied to the YIG. We interpret this as a generation of thermal magnon current that induces an additional magnetic damping torque that modify the magnetization dynamics of MSSW. We estimated the magnetic damping torque parameter from the thermal magnon to be $\sim 10^{-4}$, in a good agreement with the known value of damping parameter of YIG. We confirm our investigation with the conventional electrical spin wave resonance technique through the observation of spin wave resonance linewidth and found a modulation of resonance linewidth as a function of temperature gradient.

The technique discussed in this dissertation is expected to open new possibilities towards a better understanding of thermal magnon transport and its interplay with magnetostatic spin wave. Moreover, the technique can be extended to study thermal magnon transport locally at smaller scale in nanometer regime by employing NV center hosted in a nanometer-sized diamond.

Keywords: thermal magnon, nitrogen-vacancy (NV) center in diamond, magnetometry, magnetostatic surface spin wave, thermal spin transfer torque.

論文審査の結果の要旨

本論文は、ダイヤモンド中の窒素—空孔複合体中心 (NV 中心) をスピンセンサーとして用い磁性体中の熱マグノンの計測を行った初めての報告であり、高い新規性を有する。NV 中心はギガヘルツ帯、熱マグノンはテラヘルツ帯のエネルギー分布を有し、両者のエネルギー帯は異なる、これを解決するために、両者をギガヘルツのコヒーレント励起されたスピン波を介して結合させ、熱マグノンの計測に成功したところに独創性がある。

具体的にはイットリウム鉄ガーネット磁性絶縁体中にスピン波励起し、試料内にペルチェ素子を用いて温度勾配を印加して熱マグノンを生成してスピン波にスピントランスファートルクを印加してスピン波を変調する。この変調信号を、試料表面上に設置したダイヤモンド NV 中心を用いて、スピン二準位系のラビ振動の周波数変化から読み取り、熱マグノンによるスピントルクを定性・定量的に計測した。

ダイヤモンド NV 中心はナノスケールでのスピンセンシングを実現する量子センサーとして注目されている。一方、熱マグノンはスピントロニクス分野でスピン注入デバイスを実現する

新しい要素として注目されている。両者を結びつける本研究は、今後、大きな発展が期待される融合分野における先駆的研究として評価できる。

本論文では、ダイヤモンド NV 中心のスピン状態を計測、制御するための、光学的磁気共鳴法装置の構築と熱マグノンの生成を制御する熱勾配印加機構を自ら立ち上げ、計測装置のプログラミングによる制御機構を構築し、計測装置の最適化から始まり、研究成果を挙げるところまで研究を推進した点も評価される。

本論文の装置構築後には、磁性体粒子周辺の漏洩磁場ベクトルを、ダイヤモンド NV 中心によりマイクロメートルの空間分解能とミリテスラレベルの磁場感度で2次元イメージングすることに成功し、**Japanese Journal of Applied Physics** 誌の **Regular Paper** にアクセプトされている。本論文の主たる成果についても学術誌への投稿を準備中である。

本論文は英語で執筆、発表されており、英語の語学力も高いと評価した。審査時の質疑応答についても、

正しく答えられない点もあるが、十分な基礎学力と思考能力を備えていると評価した。

以上、本論文は、新規な熱マグノン計測法について実証したものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（マテリアルサイエンス）の学位論文として十分価値あるものと認めた。