

	の すんも
氏 名	盧 承 模
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成23年9月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	コプラナー伝送線路を使ったネットワークアナライザー強磁性共鳴測定を用いた強磁性ナノドットにおける磁化の歳差運動解析法に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 佐橋 政司
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 佐橋 政司 東北大学教授 大野 英雄 東北大学教授 村岡 裕明 東北大学教授 山口 正洋 客員教授 今村 裕明 (産業技術総合研究所)

論 文 内 容 要 旨

Micro assisted magnetic recording (MAMR) is currently of high interest in research attempting to achieve next-generation hard-disk drives with high areal densities of over 1 T bit/inch². To achieve the necessary MAMR technology, an ac magnetic field generator must be realized in a writing head device. A major candidate for the field generator is a free layer with nano-sized dot shapes as a field generating layer (FGL) in a spin torque oscillator (STO).

Generated ac field characteristics such as amplitude, frequency, and direction, which depend on a trajectory of magnetization precession (mode), have to be controlled by engineering. Several numerical simulation works indicate that the necessary ac field amplitude is as large as a few kOe and the frequency of the ac field is the same order as the ferromagnetic resonance frequency of the media (typically a few 10 GHz). It has also been pointed out that polarity of the ac field strongly affects the stability of the writing probability and the necessary ac field amplitude. The STO precession is basically regarded as a rotation around an effective field. A $\gamma M \times H_{\text{eff}}$ torque dominantly acts on the magnetic moment from a standard Landau-Lifshits-Gilbert (LLG) equation + Spin Transfer Torque (STT) model. Therefore, the STO precession and FMR precession are regarded as similar dynamics. We expect to analyze precession modes in the STO from a FMR spectrum of a nano-dot. FMR spectra for patterned magnetic film have been measured by a vector network analyzer (VNA) FMR technique using a coplanar wave guide (CPW). VNA-FMR gives ΔS data as both the parallel component to the input signal, as the real part, and the perpendicular component, as the imaginary part, in the phase plane. Both components of ΔS are a combination of symmetric Lorentzian and anti-symmetric Lorentzian.

The observed FMR spectrum amplitude is proportional to the ac magnetic susceptibility of the sample. The ac susceptibility in a magnetization precession is denoted as a tensor component of χ_{ij} as follows,

$$\begin{pmatrix} \chi_{xx} & \chi_{zx} \\ \chi_{xz} & \chi_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{dM_x}{H_{ac,x}} & \frac{dM_z}{H_{ac,x}} \\ \frac{dM_x}{H_{ac,z}} & \frac{dM_z}{H_{ac,z}} \end{pmatrix}$$

The dM_i component is proportional to the induced current in the inductor. The ac field ($H_{ac,i}$) component is proportional to the field induced around the sample by the inductor. If a straight signal line is regarded as an inductor, a $H_{ac,x}$ parallel to the x-direction is generated, and the induced current originates from dM_x according to Faraday's law. As a result, χ_{xx} will be measured in this situation. When the sample, however, is located around the shorted region of a shorted CPW, the situation becomes more complicated, as the short-terminated region is conceived as a combination of a double half-turn coil and a single wire. The half-turn coil generates the z-component of H_{ac} and picks up a current by dM_z . The summation of ac field vectors in the sample position from the inductors depends on the individual inductance, and the coil's shape and geometry. The voltage generated by the induced currents also depends on the circuit design. Therefore, the measured spectrum is not simply regarded as a χ_{xx} component in the VNA FMR. If the observed χ component is controlled by the circuit geometry and sample position of the CPW in VNA FMR, we can deduce the 3-D motion of magnetization in a FMR mode from the χ components. The information is applicable for the prediction of FGL motion and can be used to design an efficient field generation device. In this dissertation, FMR spectra for nano-sized magnetic dots of shorted CPW were measured in various positions and fields. The measured χ components from the spectra are discussed.

A shorted CPW (Fig.1.) was fabricated by photo-lithography and Ar ion etching processes for Ta (5 nm)/[Cu (100 nm)/Ta (5 nm)]₃ laminated non-magnetic metal film with small roughness ($R_a = 0.3$ nm) on quartz substrate (0.5 mm thickness and $\epsilon = 3.78$). Film stacks of SiO₂ (10 nm) /Ta (5 nm) /FeCo (20 nm)/ Ta (5 nm) were then deposited on to the CPW. Finally, a resist pattern of circular nano-dots (100 nm diameter and a few ten thousands of dots) were patterned on the signal line of the CPW by electron beam lithography. The Ta, FeCo and SiO₂ films were patterned to nano-dots by an Ar ion etching with the resist mask. Three samples with different positions A, B and C in Fig. 1 were fabricated. The center line of the

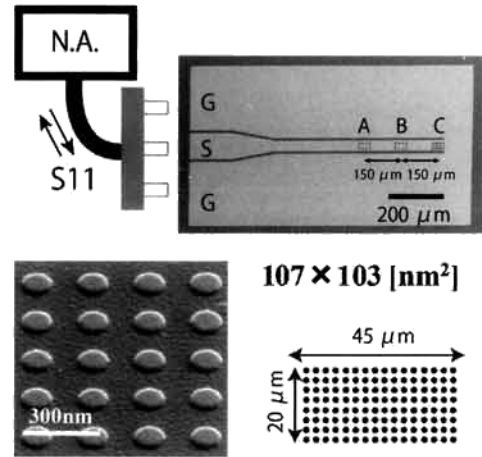


Fig.1 A Scanning electron microscope image of the fabricated CPW and the sample. A GSG probe was connected at the left end of the CPW. The samples magnetic dots were fabricated in different positions of A, B, and C. The average value of the nano-dot diameter was $107 \times 103 \text{ nm}^2$. The interval between dots was about 100 nm.

dotted area in Fig. 1 was completely fabricated in the symmetric position at the center line of the signal line.

The results are summarized as follow:

We have successfully measured two components of χ from a CPW VNA FMR technique by altering the sample position and setting the GSG probes precisely on the CPW. The two observed components (Fig. 2) give a projection of the magnetization trajectory of magnetic nano-dot to the x- and z-direction of a precession mode. Therefore, we expect to deduce the trajectory of precession in FGL from the experiments.

The magnetic circular nano-dots showed a triple mode of the precession in spite of the mono-domain and of the relatively symmetric shape of the circle under an in-plane field in Fig.3. The triple mode is caused by an inhomogeneity of the demagnetization field in the nano-dot. In the actual STO device, a small shape differences, in which created in a device fabrication processes, may also enhance an inhomogeneity of demagnetization field distribution. Therefore, the inhomogeneity would result in mode differences of between fabricated STO devices. A slight dot-size variation induced a large spectrum change, which resulted in the appearance of the FMR peak splitting in the case of a large dot size (>100 nm). However, only the uniform mode was observed in the case of a small dot size (<70 nm).

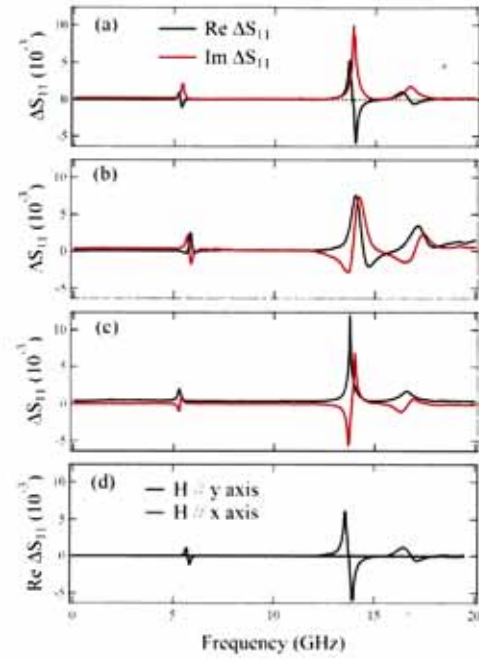


Fig.2 Observed FMR spectra (real part: black solid line, imaginary part: red solid line) for circular nano-dots at sample position in (a) A, (b) B, and (c) C. An in-plane field of 1.5 kOe was applied in the y-direction. (d) FMR spectra variation for different external field direction in position A.

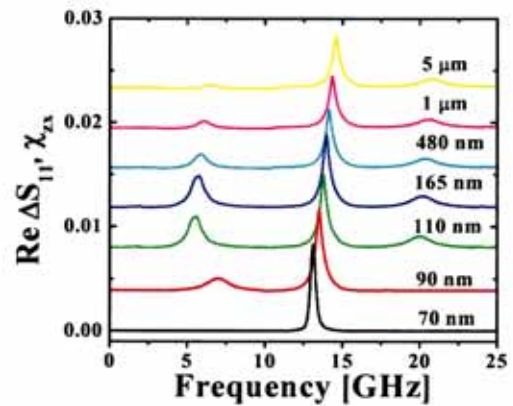


Fig.3 Sample size dependence of the FMR spectra. Each spectrum was measured under an external magnetic field of 1.5 kOe

The FMR spectra generated under out-of-plane fields also exhibited a frequency decrease and an amplitude increase (Figs. 4 (a) and 4 (b)). The 1st FMR mode was also note to gradually disappear in the highest field of 7 kOe, as shown in Fig. 4(b). Therefore, the large out-of-plane field resulted in transformation of the FMR mode in the nanodot into the uniform mode.

The applied out-of-plane field slightly decreased the resonance frequency of FMR. The elliptic cone trajectory was observed to change its ellipticity as the out-of-plane field was increased in Fig. 4. Therefore, the generated ac field components from a FGL will asymmetrically change with an out-of-plane field.

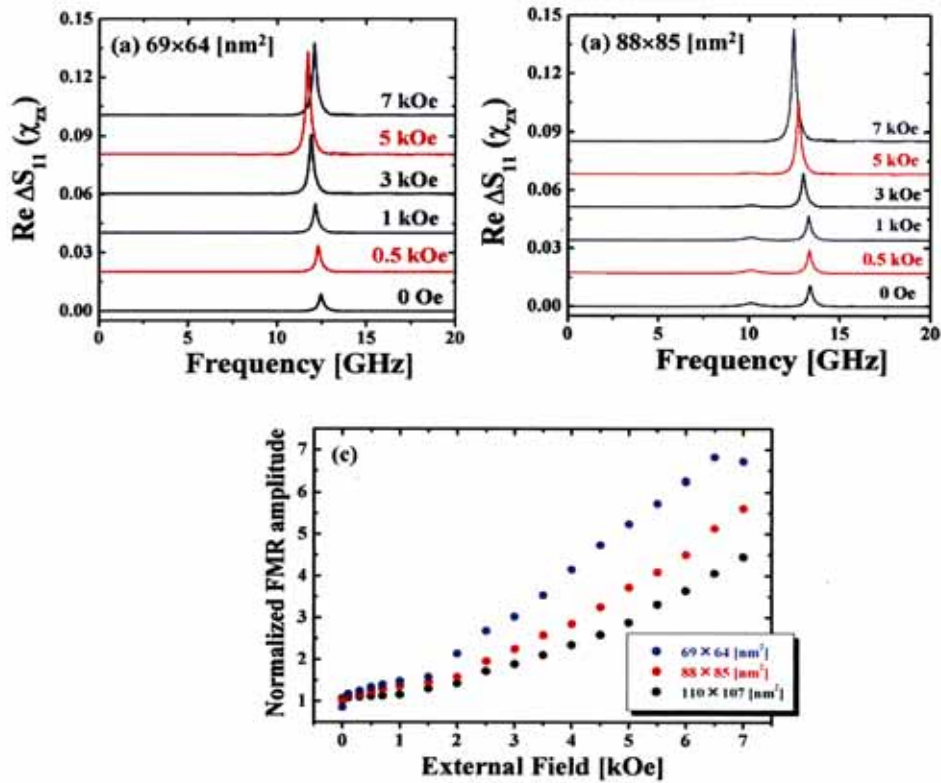


Fig. 4 FMR spectra of (a) $69 \times 64 \text{ nm}^2$ and (b) $88 \times 85 \text{ nm}^2$ arrays for different out-of-plane external fields. (c) Size dependence of FMR amplitude for different out-of-plane external fields.

論文審査結果の要旨

スピントランスファートルクによる磁化の歳差運動は、強磁性ナドットにおける電流駆動磁化反転やマイクロ波発振などの新たな磁化運動機構を可能とし、将来のストレージ・メモリ原理の要を成すものと期待されている。本研究は、これまで実験面ではあまり議論されて来なかった、強磁性ナドットの歳差運動項とポジティブダンピング項およびネガティブダンピング項（スピントランスファートルク項）から成る磁化の運動方程式のうち、振動周波数を決める磁化の歳差運動項の詳細（ m_x, m_z ）を調べることを目的に、コプラナー伝送線路を使ったネットワークアナライザ強磁性共鳴測定法を用いた磁化運動の解析法を開発し、高周波磁界変化（ x 方向）に対する z 方向の磁化の変化（ $\partial m_z / \partial h_x$ ）である高周波帯磁率（ χ_{zx} ）の観測に成功したもので、 χ_{xx} と χ_{zx} を測定して理論シミュレーションと照らし合わせることで、磁化の歳差運動の立体的な理解を可能とした極めて有意義な研究である。本論文は、その研究成果を纏めたもので全編9章よりなる。

第1章は序論であり、磁化の歳差運動の解析に関する研究の背景と本論文の目的を述べている。

第2章では、ネットワークアナライザ強磁性共鳴測定法などの実験方法と解析方法について述べている。

第3章では、 $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x$ 薄膜から作製したミクロンサイズのドットについての強磁性共鳴から求めたダンピング定数（ α ）は、Fe濃度の増加とともに単調に減少することを明らかにし、スピントランスファートルクによる磁化運動のし易さの目安となる臨界電流密度値（ αM_s ）などより、本研究の合金薄膜として $\text{Co}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}$ を選んだ理由を述べている。

第4章では、ナドットアレイの信号線路上の配置位置による共鳴スペクトルの違いを解析し、理論シミュレーションと照らし合わせることで、信号線路中心部に配置したドットアレイからは $\chi_{xx}(\Delta m_x)$ モードが、信号線路ショート端近傍に配置したドットアレイからは $\chi_{zx}(\Delta m_z)$ モードがそれぞれ観測されることを明らかにしている。 χ_{zx} モードの観測に成功した例はこれまでになく、この成果は磁化運動の立体的な理解を実験で得ることが出来ることを示す学術および工学の両面から極めて有益な知見である。

第5章では、種々のサイズのナドットアレイについて、 χ_{zx} モードの面内磁場下での共鳴スペクトルの解析を行い、ナドットサイズの微細化により、メインスペクトルに対して低周波数側に現れる反磁界に起因したエッジモードと高周波数側に現れるスピン波の定在波モードの2種類のサイドスペクトルが出現することを明らかにしている。この結果は、更なる微細化が要求されるデバイス工学において極めて重要な知見となる。

第6章では、面直磁場下での χ_{xx} および χ_{zx} モードの共鳴スペクトルの磁場依存性について詳細な検討を加えている。 Δm_x を観測している χ_{xx} の共鳴スペクトル強度は、磁場によりほとんど変化しないが、 Δm_z を観測している χ_{zx} の共鳴スペクトル強度は磁場とともに大きく増大し、磁場が膜厚方向の形状磁気異方性磁界に等しくなるあたりから傾向は逆転し、磁場の増大とともに共鳴スペクトル強度は急激な減少に転じ、共鳴周波数は増大に転じる。この結果は、 Z 方向の磁化の変化が面直磁場により増大するIn-Plane(IP)モードからOut-of-Plane(OP)モードへの磁化運動モードの変化を示唆するもので、工学上極めて重要な知見である。

第7章では、 $\text{Co}_{0.78}\text{Pt}_{0.22}$ 垂直異方性ナドットアレイについて、面直磁場下での χ_{zx} モードの磁場依存性を調べた結果を論じている。垂直異方性ナドットの χ_{zx} モードの共鳴周波数は、25 GHzと面内異方性ナドットのおよそ2倍高くなり、面内異方性とは異なり、磁場とともに共鳴周波数は増大し、4 kOeでは35 GHz近くまで増大する。一方、共鳴スペクトル強度は磁場の増大とともに減少する。この傾向は面内異方性ナドットの面直磁場下でのOPモードと良く似ており、このモードではサイドスペクトルは観測されない。この結果は、第6章で論じたIPモードからOPモードへの変化を裏付けるもので、モード解析上重要な知見である。

第8章では、面内異方性ナドットの面直磁場下での共鳴スペクトル強度の顕著な磁場依存性について、理論シミュレーションに基づき考察を加えている。 $\chi_{xx}(\Delta m_x)$ に加えて、 $\chi_{zx}(\Delta m_z)$ が得られることは、磁化の歳差運動の立体的な理解を実験において可能とするものであり、本研究で提案している解析法は、高周波スピントロニクスデバイスの設計の上で極めて有益なツールとなる。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、コプラナー伝送線路を使ったネットワークアナライザ強磁性共鳴測定法を用いた強磁性ナドットにおける高周波帯磁率（ χ_{zx} ）の観測および解析に成功し、高周波帯磁率 χ_{xx} と χ_{zx} を測定することで、磁化の歳差運動の立体的な理解を可能としたものであり、スピン電子工学および磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。