スピン波デバイス応用に向けた Mn 基ホイスラー合金

エピタキシャル薄膜の作製および磁気特性評価

○福田健二,大兼幹彦,安藤康夫

(東北大院工)

Fabrication and characterization of Mn-based Heusler epitaxial thin films for spin-wave devices

OK. Fukuda, M. Oogane, and Y. Ando

(Tohoku Univ.)

はじめに

スピン波をキャリアに用いて情報演算を行うスピン波デバイスは、低消費電力動作の観点から近年注目を 集めている.スピン波はダンピング定数が小さい材料で長距離伝搬するため、低ダンピング定数を有すると 考えられるホイスラー合金は有望である.なかでもフェリ磁性体である Mn 基ホイスラー合金は、強磁性材 料に比べて群速度が大きくなり、より長距離伝搬が期待される.しかし、Mn 基ホイスラー合金のダンピング 定数は系統的に調べられていない.本研究では、マグネトロンスパッタ法を用いて高規則度を有する Mn₂VAl エピタキシャル薄膜を作製し、結晶構造および磁気特性を評価した.

<u>実験方法</u>

超高真空マグネトロンスパッタリング法により, MgO (001) sub. / Mn_2 VAl (50 nm), $T_s = 300-700$ °C / Ta (3 nm) の膜構造の試料を作製した. 結晶構造, 磁気特性, ダンピング定数を, それぞれ XRD, VSM, 強磁性共鳴 (FMR) を用いて評価した.

<u>実験結果</u>

Fig. 1 に Mn₂VAl の L2₁ 規則度 S_{L21} と飽和磁化 M_s の T_s 依存性を示す. $T_s = 500-600$ ℃で $S_{L21} > 0.5$ の高い規則 度と $M_s > 200$ emu/cc の高い飽和磁化を有する試料が得られた. これらの値は,同じ材料・膜構造における先 行研究での値 $S_{L21} \sim 0.45$, $M_s \sim 150$ emu/cc[1]より高く,飽和磁化はバルク値の 300 emu/cc に近いことから高品 位な試料が得られたことを確認した.また,Fig. 2 に有効ダンピング定数 α_{eff} の T_s 依存性を示す. α_{eff} は $T_s = 500$ ℃で最小値をとるが,その値は約 0.1 であり,理論値の $\alpha \sim 4 \times 10^3$ [2]より遥かに高いものだった.磁化曲線の角形性が悪かったことから,ダンピング増大の原因は,磁気異方性分散などの薄膜内の磁気的不均一性 の影響が大きかったことが考えられる.



Fig. 1 $L2_1$ 規則度 S_{L21} と飽和磁化 M_s の T_s 依存性 Fig. 2 有効ダンピング定数 α_{eff} の T_s 依存性

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤 S (No.24226011) 及び東北大学マルチディメンジョン物質理工学 リーダー養成プログラムの支援を受けて行われた.

参考文献

[2] J. Chico et al., arXiv: 1604.07552v1 (2016).

^[1] T. Kubota et al., J. Magn. Soc. Jpn., 34, 100-106 (2010).

スピン波励起のための長距離伝搬型表面プラズモン 及び金属アンテナ

吉原颯汰、松本拓也、芦澤好人、中川活二

(日本大学)

Long range surface plasmon and metalic antenna for spin wave excitation Souta Yoshihara, Takuya Matsumoto Yoshito Ashizawa, and Katsuji Nakagawa

(Nihon University)

<u>はじめに</u>

近年、次世代電子デバイスに応用するためにスピン波の研究が活性化している。スピン波とは磁気モーメントの歳差運動が交換結合し伝搬する波であり、光によっても励起・伝搬することが確認されている^D。しかし、光には回折限界があるため、高集積化に向けて回折限界以下に集光することが可能な表面プラズモンポラリトン(Surface Plasmon Polariton: SPP)による局所スピン波励起が必要である。そこで本報告では計算機シミュレーションを用いて、表面プラズモンの長距離伝搬モード(Long Range Surface Plasmon: LRSP)励起の検討,及び伝搬した SPP による近接場光励起の検討を行った。

SPP の長距離伝搬モードの解析

まず,励起用の SPP を遠方まで伝搬するための伝搬構造を検 討した。シミュレーションモデルを Fig. 1 に示す。解析には Finite-Difference Time-Domain 法を用いた。層構成は, Ta₂O₅ (1,000 nm) / Al₂O₃ (400 nm) / Au (t_{Au} nm) / Al₂O₃ (400 nm) とした。光源は Ta₂O₅ 領域に 1,500 nm 四方の大きさで配置し,振幅 1 V/m,真空 波長 780 nm の TM 波を Ta₂O₅ / Al₂O₃ 界面にて全反射するよう, 入射角 60°で入射し, Al₂O₃/Au 両界面に SPP を励起した。Al₂O₃ 層厚を 400 nm とし, Au 薄膜厚を t_{Au} = 20, 30, 40, 50 nm として LRSP が効率良く伝搬する条件を調べた。ピーク値で規格化し た t_{Au} = 20, 30 nm における電界強度二乗値の時間平均を Fig. 2 に示す。図中には電界の z 方向成分を濃淡で示す。SPP は Au 薄膜の両界面に励起している。電界分布の符号が両界面で等し いことから, Au 薄膜に LRSP が励起していることが確認できる。 1/e²で定義される伝搬長は t_{Au} = 30 nm が最大を示したが、距離 30 µm 以上では t_{Au} = 20 nm が高い強度を示した。

SPP を用いた近接場光励起

上記で示した $t_{Au} = 20 \text{ nm}$ における伝搬する SPP の近傍に配置 して近接場光励起を行うプラズモンアンテナのアンテナ長につ いて検討した。シミュレーションモデルを Fig. 3 に示す。層構 成は Ta₂O₅(1,000 nm) / Al₂O₃(400 nm) / Au (20 nm) / Al₂O₃(140 nm) / Y₃Fe₅O₁₂ (YIG) (40 nm) / Gd₃Ga₅O₁₂ (500 nm)とし, YIG 上の Al₂O₃ 内に三角形状の Au アンテナを埋設した。アンテナの長手 方向の長さを $l_h = 50, 100, 150, 200, 300, 400 nm$ に設定し解析を 行った。アンテナ先端の電界強度二乗値の時間平均の l_h 依存性 を Fig. 4 に示す。 $l_h = 200 \text{ nm}$ の時,先端部の電界強度が最大に なった。この 200 nm は,伝搬する SPP の波長約 420 nm の半分 程度であるためと考えられる。

謝辞

本研究の一部は,平成25~29年度文部科学省私立大学戦略的 研究基盤形成支援事業(S1311020)の助成を受けて行われた. 参考文献

 Takuya Satoh, Yuki Terui, Rai Moriya, Boris A.Ivanov, Kazuya Ando, Eiji Saitoh, Tsutomu Shimura & Kazuo Kuroda, *Nature Photonics* 6, 662–666 (2012).



Fig. 2 Normalized power density as a function of distance on *x* direction, and distance of *z*-component electric field.



イットリウム鉄ガーネットを用いた 三端子スピン波位相干渉素子の励磁場安定性の向上

金澤直輝¹, 後藤太一^{1,2}, 高木宏幸¹, 中村雄一¹, ロス キャロライン³, グラノフスキー アレクサンダー⁴, 関口康爾^{2,5}, 井上光輝¹

(¹豊橋技科大,²JST さきがけ,³マサチューセッツ工科大,⁴モスクワ大,⁵慶応大)

Development of magnetically stable spin-wave interferometer using yttrium iron garnet N. Kanazawa¹, T. Goto^{1,2}, H. Takagi¹, Y. Nakamura¹, C. A. Ross³, A. B. Granovsky⁴, K. Sekiguchi^{2,5}, M. Inoue¹

(¹Toyohashi Univ. of Tech., ²JST PRESTO, ³MIT, ⁴Moscow State Univ., ⁵Keio Univ.)

はじめに

スピン波は、原理的に膜厚を制御することで波長を数十ナノメートルにまで短縮可能で、微細な位相干渉 ロジック回路が作製可能と考えられており、これまでの CMOS を用いた演算素子のデザインルールに縛られ ない素子の開発が期待されている。特に、集積化の観点から、面内異方性の小さい前進体積波モードのスピ ン波を用いる事が望まれており、我々は、反射波による不要な共振を抑圧する為、導波路端部に吸収体とし て金を堆積させる手法を提案した¹⁾.本稿では、これをデバイス設計に反映する為、その効果や設計手法に 関して詳細に解析し、磁場外乱中においても極めて安定性よく干渉状態を維持できる干渉器を作製した.

<u>実験方法</u>

導波路として,長さ16mm,幅1mm,膜厚18μmのイットリウム鉄ガーネット (YIG) 膜を利用する.静磁近似を基に,表面に金を形成した際の分散関係を導出し,その膜厚依存性や周波数依存性を調べた.また, 有限要素解析により,導波路構造を用意し,吸収体に適した金薄膜の構造を検証した.これに基づき,実際 に導波路を加工し,導波路表面に RF マグネトロンスパッタ法を用いて吸収体となる金を堆積させた.これ

を誘電体基板上に形成された励起回路に設置し、3035-3065 Oe の励磁場 を膜面に垂直に印加した.信号発生器により周波数 4 GHz の正弦波信号 を,Fig.1の EX1 端子と EX2 端子に入力した. EX1 端子に入力する信号 の位相を,位相器によって EX2 信号との位相差が同相(0°, ON 状態)お よび逆相(180°, OFF 状態)となるように調整し,磁場依存性を測定した.

<u>実験結果</u>

数値解析の結果,導波路表面の金膜厚が30nmまで薄くなると,材料 のダンピング定数によらず,損失の大きな波が伝送する事が判明した. 有限要素解析により,これを吸収体として端部に適用する事で,従来の 導波路(Fig.1a)と比較して,動作周波数近傍で選択的に反射波が抑圧さ れ,安定した位相面が得られる事が分かった(Fig.1b).この結果を基に, 実際に加工した導波路を用いて,位相干渉実験を行った結果,実環境を 想定した30 Oe以上の励磁場の外乱中でも,13 dB以上の高いON状態 とOFF状態の比を保持できる事を実証した.これにより,面内等方性 の高い前進体積波を用いた場合でも,極めて安定した論理状態が表現で きる事が分かった.

<u>謝辞</u>

本研究の一部は, JSPS 若手研究 (A) No. 26706009, 挑戦的萌芽研究 No. 26600043, 科研費基盤研究 (S) No. 26220902 の助成を受けて行われた.

参考文献

1) 後藤 太一 他, 第 39 回日本磁気学会学術講演会, 名古屋, 9pD-1 (2015)



Fig. 1 Simulated spin wave distribution in three-port interferometers (a) without and (b) with Au coating at the edge. EX1 and EX2 ports excite spin waves, and DT port detects the resulting spin wave. Brighter region shows stronger excitation.

交換結合複合膜におけるスピンツイスト構造の定在スピン波共鳴特性

牙暁瑞,大藪周平,田中輝光,松山公秀 (九州大学 大学院システム情報科学府)

Standing spin wave resonant properties of spin-twist structure in exchange coupled composite films

X. Ya, S. Oyabu, T. Tanaka, and K. Matsuyama

(ISEE, Kyushu University)

<u>はじめに</u>

近年,hard/soft 交換結合膜の exchange spring 効果を利用したマイクロ磁気デバイスの動作高周波化に関す る報告がなされている¹⁾.本研究では,磁気異方性の小さい中間層の両側に垂直磁化層を配した交換結合複 合膜中に形成されるスピンツイスト構造に着目し,そのスピン波動特性について計算機シミュレーションを 行った.交換結合させた構造を利用することで中間層のスピン波共鳴周波数を高周波化し,さらにその周波 数を広い範囲で制御できる膜構造および磁気特性について検討した.

<u>計算方法</u>

3 層構造の磁性細線(垂直磁化層/中間層/垂直磁化層)を 想定した計算モデルを Fig. 1 に示す.上部にスピン波励起 用導体を 2本 (Generator 1, 2),その導体間にスピン波検出コ イル (Detection area)を配置している.本研究では磁性細線を 構成する各磁性層の磁気特性および膜厚を変えて,定在ス ピン波 (SSW)の共鳴周波数および誘導出力電圧を LLG 方程 式の数値計算により求めた.垂直層および中間層の飽和磁 化は共に $M_s = 1000 \text{ emu/cc}$ とし,垂直層の垂直磁気異方性磁 界 $H_k = 20 \sim 30 \text{ kOe}$ とした.上下の垂直層の磁化を反平行に 設定し,中間層近傍に形成されるスピンツイスト構造のス ピン共鳴特性についてマイクロマグネティクスシミュレー ションを行った.

計算結果

2本の導体線に逆位相($\Delta \phi = \pi$)のマイクロ波交流電流を印 加した場合,電流磁界分布を反映して2次モードの定在ス ピン波が最低次の共鳴モードとなる.2次モード共鳴周波数 f_{res} の垂直異方性磁界 H_k に対する依存性をFig.2に示す. 垂直層の異方性磁界は、上下層共に変化させた場合と下層 のみのを変化させた場合の二つ場合について比較した.上 層及び下層の異方性磁界 $(H_{k,t}, H_{k,b})$ を共に増大させた場合, 垂直層との交換結合を介して誘起される中間層の交換等価 磁界が大きくなり f_{res} が高くなる.一方 $H_{k,t}$ を20 kOe に固 定し、 $H_{k,b}$ のみを変化させた場合、中間層の実効的な交換等 価磁界の変化は小さく、共鳴周波数はほとんど変化しない.

Fig. 3 (a), (b) は2次モード共鳴周波数 fresの上下垂直層の異方性磁界に対する依存性を垂直層厚および中間層厚をパラメータとして示している. Fig. 3 (a)は上下垂直層の膜厚を12 nm に固定し、中間層厚を変化させた場合を示す.中間層厚が薄いほど fresの変化範囲は広くなる.これは中間層厚が交換長よりも薄い場合には中間層全体に交換等価磁界



Fig. 1. Schematic of designed exchange-coupled trilayer strips consists of magnetic strip with perp./mid/perp. layers, SW generators and detector, and corresponding magnetization configuration.



Fig. 2. The dependence of the resonance frequency f_{res} on the perp. layer H_k in the case when H_k for both the hard layers variable and only bottom perp. layer variable.



Fig. 3. The dependence of the resonance frequency f_{res} on the perp. layer H_k as a parameter of (a) mid. layer thickness and (b) perp. layer thicknesses.

が効率的に作用し、垂直層による異方性磁界増大の効果が顕著に現れた結果であると推測される. Fig. 3 (b) は中間層厚を 2 nm に固定し、上下垂直層厚を変化させた場合を示している. 同図から 8nm 以下の領域では 垂直層厚が厚くなるに従って fresの増大範囲が広くなるが、10 nm 程度以上では膜厚増大による周波数変化の 効果は殆ど認められない. これは垂直層において、磁壁幅と同程度以上中間層から離れた領域は、exchange spring 効果を介した中間層のスピン波共鳴周波数増大への寄与が少ないためと考えられる.

<u>参考文献</u>

1) X. Ya, et al, *IEEE Trans. Magn.*, **51** (2015)

平行伝送線路を用いたパーマロイカイラル構造のマイクロ波分光

児玉俊之, 草薙勇作*, 岡本聡*, 菊池伸明*, 北上修*, 冨田知志, 細糸信好, 柳久雄 (奈良先端大物質, *東北大多元研)

Microwave spectroscopy of single permalloy chiral structure on coplanar waveguide T. Kodama, Y. Kusanagi*, S. Okamoto*, N. Kikuchi*, O. Kitakami*, S. Tomita, N. Hosoito, H. Yanagi (GSMS-NAIST., *IMRAM Tohoku Univ.)

<u>はじめに</u>

強磁性カイラル構造では時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れており、磁気カイラル効果[1]が期 待できる他、カイラル構造での三次元スピンテクスチャにおける共鳴現象も興味深い。我々は、強磁性金属 のマイクロサイズのカイラル構造を作製し、キャビティを用いた強磁性共鳴を実験的に調べてきた[2]。より 詳細な議論へ向けて、今回は強磁性金属であるパーマロイ(Fe_{21.5}Ni_{78.5}, Py)のカイラル構造を平行伝送線路 上に配置し、周波数掃引でマイクロ波の吸収を調べた。

<u>実験方法</u>

応力誘起自己巻上げ法[2]を用いて作製した Py カイラル 構造を、図1(a)のように信号線路と接地線路を跨ぐように 配置した。直流磁場 Hext はカイラル軸に平行に印加し、ベ クトルネットワークアナライザーを用いて、マイクロ波の 透過特性を測定した。

<u>実験結果</u>

直流磁場を印加せずに共鳴が起きていないスペクトル との差分ム|S₂₁|を図 1(b)に示す。*H*_{ext}=2.0 kOe において 12.9 GHz と 15.8 GHz に見られるピークは直流磁場の増大につ れて高周波シフトしていることが分かる。これらは順に、 強磁性共鳴およびスピン波共鳴であると考えられる。また 磁場の大きさに共鳴周波数が依存しないディップが 7.8 GHz に現れている。低磁場での測定を行ったところ、外部 磁場が 0 Oe から 40 Oe の間で、このディップは出現し始 めることが分かった。Py カイラル構造を信号線路からは み出さないように配置した場合は、強磁性共鳴の吸収のみ が観測された。

図1(c)にΔ|S₂₁|とは反対方向に透過させたマイクロ波の 強度Δ|S₁₂|との差分Δ|S₂₁|-Δ|S₁₂|の外部磁場依存性を示す。 (b)で得られた強磁性共鳴由来の信号周波数にのみ非相反 性が見られる。また図1(a)の下側の接地線路と信号線路を 跨ぐようにメタ分子を配置すると、(c)に見られたピーク位 置とディップ位置が反転した。信号線路から接地線路へは み出さないようにメタ分子を配置した場合には非相反性 は現れなかった。また線路を跨ぐようにPyリング試料を 配置した場合も、非相反性は得られなかった。以上のこと から、線路を跨ぐ配置に加え、三次元構造であることが、 今回観測された非相反性の発現には重要な要素であると 分かる。



(a)平行伝送線路上に固定された Py カイラル 構造.(b)マイクロ波透過特性の外部磁場依存 性.(c)透過特性の差分の外部磁場依存性

参考文献[1]S. Tomita, et al., Phys. Rev. Lett. 113, 235501 (2014).[2]T. Kodama, et al., Appl. Phys. A. 122, 1, 41 (2016).

80NiFe 薄膜におけるレーザー励起スピン波伝播の対称性

^o上牧 瑛¹, 佐々木 悠太¹, 飯浜 賢志², 安藤 康夫², 水上 成美¹ (東北大 WPI-AIMR¹, 東北大院工²) Propagating Symmetry on Pulse-Laser Induced Spin Wave in 80NiFe Thin Films ^oA. Kamimaki¹, Y. Sasaki¹, S. Iihama², Y. Ando², S. Mizukami¹ WPI-AIMR, Tohoku Univ.¹, Dept. of Appl. Phys, Tohoku Univ.²

背景

金属薄膜におけるスピン波の研究は、これまでマイクロ波励起の手法を中心に行われてきた.またその励 起に関して、高周波電流より生じるマイクロ波の位相を反映して非相反的になるといった報告がある¹⁾.こ れに対し、より高い時間・空間分解能を有する手法としてパルスレーザー光を用いた pump-probe 法が挙げら れる²⁾.この方法では、光パルスの瞬間的な加熱を利用し磁気異方性を変化させることでスピン波を誘起し ているが、この非相反性を実験的に観測した報告はこれまで無く、その励起メカニズムを明らかにすること が基礎的な観点から重要である.そこで本研究では、80NiFe(Py)薄膜に対し pump-probe 法を用いたスピン波 伝播の評価を行い、その励起や伝播における空間対称性を調べた.

実験方法及び結果

測定に用いた Py 薄膜はマグネトロンスパッタリング法により作製し, 膜厚は d = 20 nm とした.また,ス ピン波伝播の測定には時間・空間分解磁気光学カー効果(Space-and-Time Resolved Magneto-Optical Kerr Effect; STR-MOKE)を用いた.この系の模式図を図1に示す.Pump 及び probe 光の波長はそれぞれ約 400,800 nm で あり,その強度をそれぞれ7,3 mW とした.外部印加磁場の大きさは $H_0 = 0.3$ T とし,膜面直からの磁場角度 を $\theta_{\rm H} = 10$ deg.とした.この磁場と直交する x 軸上で probe 光位置を変化させた際の測定結果を図2に示す. カー回転角の変化 $d\theta_{\rm K}$ は熱による寄与を除いた値とし、 $\pm x$ 方向で対称的に伝播している.これは、熱的に励 起された静磁表面波(Magneto-Static Surface Wave; MSSW)が対称的であり、マイクロ波励起の実験で生じる非 相反性を持たないことを示す.この薄膜を用いたスピン波伝播の詳細とその伝播特性を当日議論する.

謝辞

本研究は,科研費新学術領域「ナノスピン変換科学」(N0. 26103004), GP-Spin Program ならびにスピントロニクス学術 連携研究教育センターの支援を受けた.

参考文献

- 1) T. Schneider et al., Phys. Rev. B 77, 214411 (2008); K. Sekiguchi et al., Appl. Phys. Lett. 97, 022508 (2010).
- 2) S. Iihama *et al.*, ArXiv: 1601. 0724 (2016).



図 1 STR-MOKE 測定系の模式図. 外部印加磁場の向 きを y-z 平面にとり, probe 光はこれと膜面内で直交 するようにとった±x 方向にスキャンする。



図 2 スピン波伝播の測定結果. Pump 光照射から probe 光が膜面に到達するまでの遅延時間を Δt とした. $\pm x$ 方向に対称的なシグナル $\Delta \theta_x$ が伝播している.