

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21246049

研究課題名（和文） コヒーレント位相スピントランスファーマイクロ波発振磁性体の開発

研究課題名（英文） Development of large STT microwave oscillation magnet with coherent phase-locking

研究代表者

佐橋 政司 (SAHASHI MASASHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20361123

研究成果の概要（和文）：

1~2nmφの強磁性金属ナノ接点を複数個含む独自考案の NOL(Nano-Oxide Layer)を用い、安定した強磁性ナノ接点部をもつスピナル薄膜素子を作製、その接点領域に閉じ込められたナノ狭帯磁壁による磁気抵抗を利用した新規なマイクロ波発振磁性体の開発に取り組み、ナノ接点磁壁型磁気抵抗素子におけるスピントルク発振は、ナノ接点に狭窄された磁壁駆動であることを理論と実験より明らかにした。スピン偏極層と発振層の磁化配置が反平行に近い磁化配置における高周波発振(強磁性共鳴周波数)において、0.13%のダイナミック磁気抵抗と磁気抵抗換算発振出力 0.2μW(Q=600)を得ることに成功した。また、発振層が磁気渦構造となる磁化配置において、世界で最も高いダイナミック磁気抵抗(2.5%)と磁気抵抗換算にして世界最高の発振出力 1μW(Q=200)を得ることに成功した。これらの発振は、Auto-Oscillation モデルにより説明することが可能であり、閾値電流を下げ、投入電流を増やすことで更なる高出力化と高 Q 化を図ることが出来ることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

We have succeeded in obtaining good oscillation power in terms of magnetoresistance ratio with the confined domain wall type magnetoresistive devices, where $\sim 1\mu\text{W}(Q=200)$ and $0.2\mu\text{W}(Q=600)$ were confirmed in vortex structure and near anti-parallel state, respectively. These high level oscillations could be explained by Auto-Oscillation model, which means that larger power oscillation with higher Q-value is realized by decreasing threshold current to auto-oscillation mode. In addition, the high sensitivity of 1.5V/W in STT-FMR measurement was obtained in the confined domain wall MR devices. So, good transmitter/receiver performance of the miniaturized confined domain wall MR devices was verified in this study, leading to realization of wireless chip to chip communication (wireless 3D packaging).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2010年度	21,200,000	6,360,000	27,560,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	33,700,000	10,110,000	43,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：電気・電子材料（半導体、誘電体、磁性体、超誘電体、有機物、絶縁体、超伝導体など）、マイクロ波発振磁性体

1. 研究開始当初の背景

近年、100nm 以下に微細加工された微小な金属強磁性体薄膜素子(GMR/TMR 素子)において、スピン偏極電流による磁化の反転現象やスピン偏極電流によって誘起されるスピンドायナミクス(伝導電子スピンから局在モーメントへのMomentumのトランスファー)に起因したマイクロ波(GHz 帯)の発振が、米国コーネル大学やNIST、Freescaleより報告され、新たなスピンドバイスシステムの開発とその応用への期待が高まっている。しかしながら、スピン偏極電流駆動磁化反転については、現在MRAM(スピンRAM)への応用研究が盛んに行われている一方、スピントラnsファートルクマイクロ波発振については、その出力レベルが 10nWA^{-2} (1mAの投入電流で0.1pWのマイクロ波出力)程度と実用検討に入るには、あまりにも出力レベルが小さく、いまだ応用研究には至っていなかった(S. Kaka et al, Nature, 437, 15 September 2005, 389-392. F. B. Mancoff et al, Nature, 437, 15 September 2005, 393-395)。したがって、本研究課題では、複数の強磁性ナノ接点(導電チャネル:狭窄部)を含む極薄の絶縁体層であるNOLを用いたナノ狭窄磁壁型磁気抵抗素子におけるナノ接点に狭窄された磁壁に起因するマイクロ波発振ならびに、マルチチャネル間の位相同期に関する研究を行い、高出力化への物理的指針を得ることを目標とした。このようなナノ狭窄磁壁系では、スピン波モードのPhase Lockingやマイクロ波電流そのものの電気的結合によるチャネル間の位相同期が期待され(S. M. Rezende et al, PRL (2007). B. Georges, A. Fert et al, APL (2008))、少なくともNOL中の導電チャネル数(強磁性ナノ接点数)倍に出力が増大することが期待された。また、この金属強磁性体薄膜素子を用いたマイクロ波の発振は、微小な磁性体抵抗(R)素子(<1 μm 角)(本課題ではナノ狭窄磁壁型MR素子)のRがスピン偏極電流からのスピントラnsファートルクによりダイナミックな抵抗変化を生じ、電圧がマイクロ波周波数で発振する、所謂自励発振素子であるため、これまでのLCR発振のようにLとCを組み合わせる必要がなく、マイクロ波発振デバイスのフットプリント(専有面積)をこれまでの壁(1mm 角)を突破し、まさにナノサイズにまで小型化することが可能となる。このことは、小型で低消費電力の発振・検波素子を提供することが可能となるものであり、伝送回路(アンテナ)との組み合わせにより、小型で低消費電力の近距離無線通信やLSIのインターコネクタ(無線配線)および生体情報通信や生体医療などのこれからの発展が期待される無線分野に大きなインパクトを与えるものであると考えた。

2. 研究の目的

本研究課題では、極薄(~1nm)の酸化物層中に、1~2nm ϕ の強磁性ナノ接点(導電チャネル(金属伝導))を複数個形成した独自考案のNOL(Nano-Oxide Layer)を用い、安定した強磁性ナノ接点部をもつスピンバルブ薄膜素子を作製、その接点領域に閉じ込められるナノ狭窄磁壁による磁気抵抗を用いた新規なスピントラnsファートルクマイクロ波発振磁性体の開発を行い、実用化検討を可能にするための高出力化についての物理的指針(特に磁気抵抗比と位相同期)を得ることを目的とし、研究を行った。

3. 研究の方法

(1)ナノ接点の定量評価

マイクロ波発振特性を決める重要な物理量の1つである磁気抵抗比の向上指針を得るべく、Conductive AFMなどを用いたナノ接点の超高真空その場観察法を確立し、ナノ接点径、ナノ接点密度を求めることにより、ナノ接点の比抵抗(電気伝導率)を定量的に評価した。具体的には、ナノ狭窄磁壁型磁気抵抗(NCMR: Nano Contact Magnetoresistance)素子のスペーサ層にあたるNOL(Nano-Oxide Layer)表面を0.1nm(1Å)程の極薄のAuでE/B蒸着法を用いて被膜し、同じ超高真空チャンバー内で100°Cのその場熱処理を施すことによりホール型のナノ接点にAuを埋め込み、探針とナノ接点間の接触抵抗を極限的に下げることで、ナノ接点電流とトンネルノイズ電流を分離した。測定したサンプルは、面積抵抗(RA)が $1.5\Omega\mu\text{m}^2$ のサンプルで、Au被膜を行うことにより計測可能な電流値の上限である333nAのナノ接点電流を計測することが出来た。また、電流像から求めたナノ接点占有率と平均直径およびナノ接点数と面積抵抗を用い、ナノ接点を構成する $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ のフェルミ波長から単一ナノ接点の抵抗値(平均値)ならびに比抵抗を算出した。

(2)ナノ接点純度とスピン分極率および磁気抵抗比の向上

人為的に酸素を侵入させた $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{O})$ 膜を作製することで、酸素の侵入による比抵抗の変化、ならびにNCMR変化率に大きく寄与するバルク散乱スピン非対称係数(スピン分極率) B との関係を明らかにした。作製した $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}(\text{O})$ 膜は、膜厚1nmまたは2nmの $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 薄膜に対し、0.05kLという低酸化強度の自然酸化を行った層を、何層にも積層する方法で酸素を含んだ $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 薄膜を作製した。 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ の膜厚を変えることで、酸素の含有量を調整した。このように作製した

Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜に対し、CIP 配置の抵抗の膜厚依存性から比抵抗 ρ を、Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜を CPPGMR-SV のフリー層に用いた Valet-Fert モデルによるフィッティングからバルク散乱スピン非対称係数 β を求めた。

(3) マイクロ波発振素子の試作研究

マイクロ波発振素子を試作し、その発振特性の磁界印加角度依存性を調べることにより、発振層磁化とスピン偏極層磁化の相対角度と発振出力との関係を明らかにし、ナノ狭窄磁壁型磁気抵抗素子における発振層のスピントランスファートルク自励発振は、ナノ接点に狭窄された磁壁駆動であることを理論と実験より明らかにした。また、発振層の膜厚を厚くし、ナノ接点構造における磁化のマイナーループ上で安定した磁気渦 (Vortex) を発振層に形成し、発振層の磁気構造が磁気渦 (Vortex) 構造となる磁化配置における発振特性とその解析も併せて行い、高発振出力化への物理的指針を得た。

(4) フェーズロック機構の研究

素子の発振周波数相当の外部マイクロ波電流を素子に注入する方法で、素子の電気結合フェーズロック特性を評価するなど、複数の素子間および接点間のフェーズロック機構の理論および実験的解明を行い、素子間の電氣的フェーズロックを起こさせるための素子出力および接点間の磁氣的フェーズロックを起こさせるためのスピン波モードを明らかにした。

4. 研究成果

(1) Conductive AFM などを用いたナノ接点の超高真空その場観察法を確立し、ナノ接点径、ナノ接点密度を求めることにより、ナノ接点の比抵抗(電気伝導率)を定量的に評価することに成功した。表面を 0.1nm(1Å)程の極薄の Au で E/B 蒸着法用いて被膜し、同じ超高真空チャンバー内で 100°C のその場熱処理を施すことによりホール型のナノ接点に Au を埋め込み、探針とナノ接点間の接触抵抗を極限的に下げることで、ナノ接点電流とトンネルノイズ電流を分離することに成功、その電流像の閾値電流に対するナノ接点数をプロットすることにより、閾値電流に対してナノ接点数が変化しないプラトーな領域を見出すことができ、ナノ接点電流とトンネルノイズ電流を分離することに成功した(図 1)。ナノ接点電流が計測されたナノ接点の個数は 200nm 角に 18 個と見積もられ、Au 被膜を行っていない電流像から求めた占有率(0.20%)とナノ接点 18 個の平均直径(1.4nm)、およびナノ接点数と RA を用い、ナノ接点を構成する Fe_{0.5}Co_{0.5} のフェルミ波長から単一ナノ接点の抵抗値(平均値)ならびに

比抵抗を算出した。ナノ接点の直径が平均で 1.4nm と電子伝導の平均自由行程以下になっていることから、ナノ接点での電子伝導は、拡散伝導(drude 抵抗)とバリスティック抵抗(sharvin 抵抗)の両方を考慮する必要がありと考え、本研究では、ナノ接点の抵抗はその和であると仮定した[M. J. M. de Jong, Phys. Rev. B 49 7778 (1994)]。この方法で算出された抵抗値は 660Ω、drude 抵抗成分の比抵抗 ρ は約 60μΩcm と求めることができ、この比抵抗値は CIP 配置の抵抗の膜厚依存性で求めた Fe_{0.5}Co_{0.5} 単層膜の比抵抗値 16.3μΩcm と比較しても約 3.7 倍と大きな値となっていることが判った。この高比抵抗ナノ接点は、Al₂O₃ 酸化物面内に 1nm 程度の Fe_{0.5}Co_{0.5} ナノ接点と共存していることを考えると、Fe_{0.5}Co_{0.5} 内部への酸素の侵入が予想される。RA が 1.5Ωμm² の NCMR-SV でも、1nm 程度のナノ接点の作製に成功しているにも関わらず MR 変化率が 5% と低い値が得られていることは、ナノ接点への酸素の侵入が、スピンに依存しない散乱を引き起こし、磁気抵抗比を低下させていることが推察された。

(2) ナノ接点純度とスピン分極率および磁気抵抗比の向上

人為的に酸素を侵入させた Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜を作製することで、酸素の侵入による比抵抗の増加、ならびに NCMR 変化率に大きく寄与するバルク散乱スピン非対称性係数(スピン分極率) β の低下を明らかにした。作製した Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜は、膜厚 1nm または 2nm の Fe_{0.5}Co_{0.5} 薄膜に対し、0.05kL という低酸化強度の自然酸化を行った層を、何層にも積層する方法で酸素を含んだ Fe_{0.5}Co_{0.5} 薄膜を作製した。Fe_{0.5}Co_{0.5} の膜厚を変えることで、酸素の含有量を調整した。このように作製した Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜に対し、CIP 配置の抵抗の膜厚依存性から比抵抗 ρ を、Fe_{0.5}Co_{0.5}(O)膜を CPPGMR-SV のフリー層に用いた Valet-Fert モデルによるフィッティングからバルク散乱スピン非対称係数 β を求めた。それぞれ得られた比抵抗 ρ と β は、[Fe_{0.5}Co_{0.5}2nm/自然酸化]n では 37μΩcm と 0.75、[Fe_{0.5}Co_{0.5}1nm/自然酸化]n では 76.7μΩcm と 0.35 と求めることができた。一方、純 Fe_{0.5}Co_{0.5} の比抵抗 ρ と β は 16.3μΩcm と 0.82 であるから、酸素を侵入させることによって比抵抗は増大し、逆に β は低下することが実験的に明らかになった。 ρ と β の関係をプロットすると二次関数でフィッティングすることができ、ナノ接点の ρ と β の関係を実験的に求めることができた。

この ρ と β の関係から、上述した RA1.5Ωμm²、MR 変化率 5% のナノ接点の比抵抗 60μΩcm での β を見積ると 0.4~0.5 と

なり、産業技術総合研究所の今村グループによる β と NCMR の理論計算と比較すると、ほぼ同じ値となっていることが判った。以上のことから、 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ 内に酸素不純物が侵入し、置換するとナノ接点の比抵抗が著しく増大し、それに伴ってナノ接点のバルク散乱スピンの非対称性係数が大幅に低下することが判った。しかしながらこの結果は、高磁気抵抗比化への重要な指針を示しており、何らかの還元効果を用いて酸素の侵入量を低下させ、比抵抗を純 $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ に近づけることができれば、0.82 という高いバルク散乱スピン非対称性係数から 100% を超える NCMR 変化率が得られることが期待される(図 2)。事実還元効果のある残存 Al や Si と高温熱処理を組み合わせることで、 $\text{RA}0.5\Omega\mu\text{m}^2$ において、~40% の磁気抵抗比を得ることに成功している。

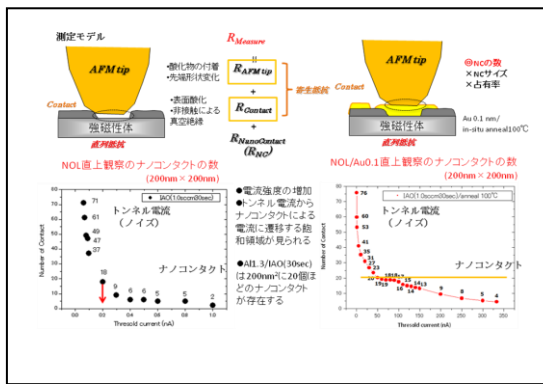


図 1 ナノ接点電流とトンネルノイズ電流の分離に成功

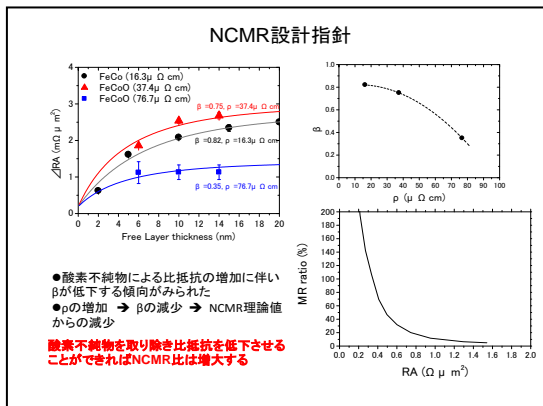


図 2 ナノ接点への酸素の侵入(クラスター形成)と接点比抵抗および接点のバルク散乱非対称係数(β)の関係、ならびに高 NCMR 比への実験的指針
(3)最も重要なマイクロ波発振素子に関する

試作研究の成果をまとめると a)反平行に近い磁化配置における高周波発振、b)磁気渦構造磁化配置における高出力発振、c)Auto-Oscillation モデルによる発振特性の解析と発振出力設計の 3 点となる。

①反平行に近い磁化配置における高周波発振

ナノ接点磁壁磁気抵抗素子における発振層のスピントランスファートルク自励発振は、ナノ接点に狭窄された磁壁駆動であることを理論と実験より明らかにした。産業技術総合研究所の今村グループが提唱するナノ接点に狭窄された磁壁振動駆動のマイクロ波発振においては、スピン偏極層と発振層の磁化配置が反平行に近い配置状態で磁壁振動駆動の高い周波数(50~100GHz)をもつマイクロ波の自励発振が励起することが、理論シミュレーションの結果より明らかにされた。そしてより詳細なシミュレーションの結果、スピン偏極層と発振層の磁化の相対角が 125 度から 160 度の間にあるときのみ磁壁振動駆動のマイクロ波発振が励起されることが示された。そこで、印加する磁場の方向をスピン偏極層の磁化の方向に対して角度を持たせる実験を行い、理論の検証を行った。その結果、相対角が 140 度近傍でのみ強い発振が励起されることが、周波数帯は 10GHz 程度の強磁性共鳴周波数と理論とは異なるもの実験的にもナノ接点磁壁磁気抵抗素子の自励発振は、磁壁振動駆動であることが検証され(図 3)、高出力発振および高周波発振への設計指針を得た。また、この設計指針に基づき設計した素子において、0.13% のダイナミック磁気抵抗を得るとともに、磁気抵抗換算発振出力 $0.2\mu\text{W}$ ($\Delta R/R=0.05$ で $0.001\mu\text{W}$) と 600 の Q 値を得ることに成功した(図 4)。併せて、Mixer のような特別のデバイスを用いる必要なくなるマイクロ波自励発振素子自体による周波数変調効果も明らかにするなど応用展開上重要な成果を導きだした。

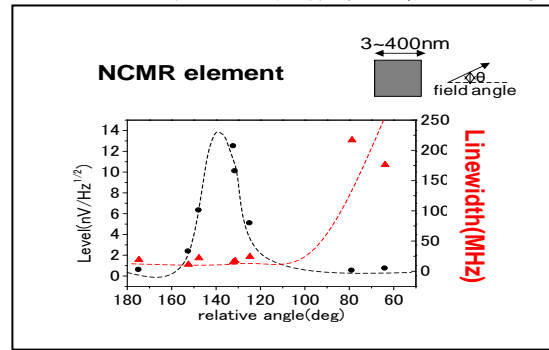


図 3 実験的にもナノ接点磁壁磁気抵抗素子の自励発振は、磁壁振動駆動であることを検証

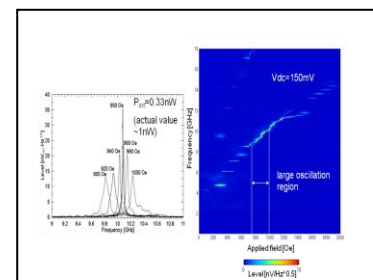


図 4 磁気抵抗換算発振出力 $0.2\mu\text{W}$ ($\Delta R/R=0.05$ で $0.001\mu\text{W}$) と 600 の Q 値を得ることに成功

②磁気渦構造磁化配置における高出力発振

発振層の磁気構造が磁気渦構造となる磁化配置において、世界で最も高いダイナミック磁気抵抗(2.5%)を得(図 5)、磁気抵抗換算にして世界最高の発振出力 $1\mu\text{W}$ ($\angle R/R=0.2$ で $0.2\mu\text{W}$)と 200 の Q 値を得ることに成功した(図 6)。この結果は、発振層の膜厚を厚くし、ナノ接点構造における磁化のマイナーループ上で安定した磁気渦を発振層に形成することにより得られる。その結果として磁気抵抗換算にして世界最高の発振出力 $1\mu\text{W}$ ($\angle R/R=0.2$ で $0.2\mu\text{W}$)を得ることが出来たものである。

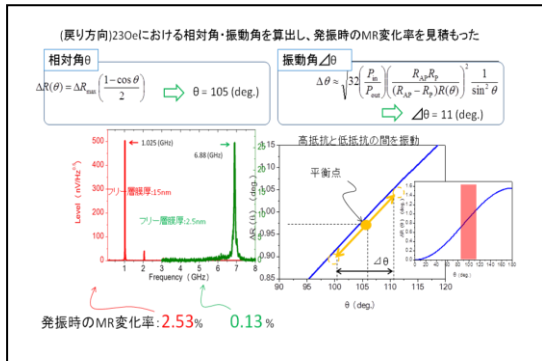


図 5 発振時における MR 変化率の見積もり

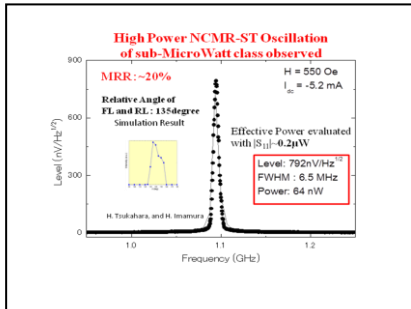


図 6 磁気抵抗換算にして世界最高の発振出力:
 $1\mu\text{W}$ ($\angle R/R=0.2$ で $0.2\mu\text{W}$)

③Auto-Oscillation モデルによる発振特性の解析と発振出力設計

磁気渦構造磁化配置における高出力発振について、Slavin の Auto-Oscillation モデルによる発振特性の解析を行った。発振出力の逆数のバイアス電流依存性より、算出した閾値電流(I_{th})の前後で発振モードが熱励起からスピントルク励起へと移行、移行後の高出力自励発振は、Slavin の Auto-Oscillation モデルで説明可能なことが判った。フィティングより求めた発振有効体積が発振層(フリー層)体積の 92%となることから、フィティングの妥当性は裏付けられている。この解析結果より、閾値電流と発振エネルギーの関係が求められ、更なる高出力発振と狭線幅(高 Q)の設計指針を得、閾値電流 I_{th} を下げて、投入電流 I_{dc} を増加させることで、10 倍以上の出力増大(図 7)と 1/20 の狭線幅(300kHz、

$Q \sim 3000$)(図 8)が見込めることが明らかとなり、発振出力設計を確立することが出来た。

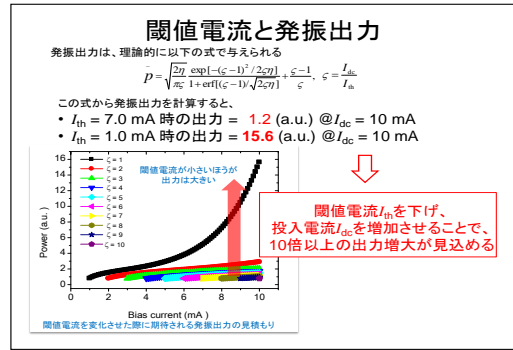


図 7 閾値電流 I_{th} を下げて、投入電流 I_{dc} を増加させることで、10 倍以上の出力増大

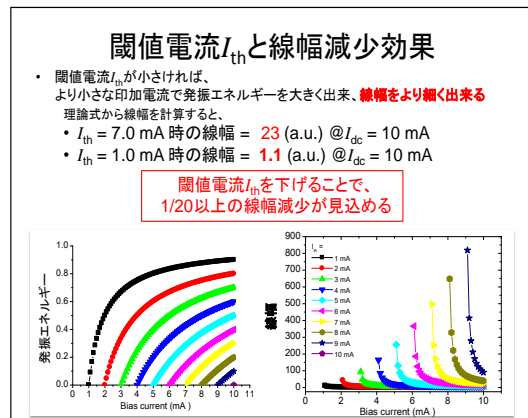


図 8 1/20 の狭線幅(300kHz、 $Q \sim 3000$)が見込まれる

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

原著論文(査読有) ; 16 件

1. T. Kaneko, S. M. Noh, K. Miyake, M. Sahashi, and H. Imamura, "Spin wave modes in magnetic nanodisks under in-plane magnetic field", Mesoscale and Nanoscale Physics, arXiv:1202.6464v1(2012)
2. K. Miyake, S.M. Noh, T. Kaneko, H. Imamura, and M. Sahashi, "Study on High Frequency 3D Magnetization Precession Modes of Circular Magnetic Nano-Dots using CPW VNA FMR(invited)", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, (掲載決定)
3. K. Miyake, Y. Saki, A. Suzuki, S. Kawasaki, M. Doi, and M. Sahashi, "Modification of Magnetic Nanocontact Structure by a Bias-Voltage-Induced Stress and its Influence on Magnetoresistance Effect in TaOx Nano-Oxide Layer Spin Valv", Japanese Journal of applied physics, (掲載決定)

4. Naoki Shimomura, Kazuya Sawada, Tomohiro Nozaki, Masaaki Doi, and Masashi Sahashi, "Demonstration of magnetoelectric effect in ultrathin Cr₂O₃/Fe₂O₃ nano-oxide layer by training effect", Appl. Phys. Lett., (掲載決定)
5. Y. Okutomi, K. Miyake, M. Doi, H. N. Fuke, H. Iwasaki, and M. Sahashi, "Spintransfer torque driven ferromagnetic resonance in nano-contact magnetoresistive devices and its characteristics", Journal of Applied Physics, 109, 07C727 (2011)
6. S. Noh, D. Monma, K. Miyake, M. Doi, and M. Sahashi, "Damping Constant Influence on Spin Dynamics in Field Generating Layer of STO for MAMR Writing Head", Journal of Physics: Conference Series, 266, 012061 (2011)
7. S. Noh, D. Monma, K. Miyake, M. Doi, T. Kaneko, H. Imamura, and M. Sahashi, "Spin Dynamics in Ferromagnetic Resonance for Nano-Sized Magnetic Dot Arrays: Metrology and Insight Into Magnetization Dynamics", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 47, 2387 (2011)
8. Y. Shiokawa, M. Shiota, Y. Watanabe, T. Otsuka, M. Doi, and M. Sahashi, "Oxidation and Annealing Process: Morphological Change and Nanocontact MR in Spin Valves With FeCo-AIO_x NOL Spacer", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 47, 3470 (2011)

[学会発表] (計 84 件)

1. Y. Kozono, Y. Okutomi, K. Miyake, S. Hashimoto, H. Iwasaki, and M. Sahashi, "NMR based spin-torque microwave generator and detector with high signal purity", The 19th International Conference on Magnetism, Busan, Korea, 2012年7月10日(査読あり)
(他 83 件)

[図書] (計 1 件)

佐橋政司・土井正晶・三宅耕作
「スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線」シーエムシー出版
監修: 高梨弘毅 2009年6月30日発行 229-247
ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

1. 名称: MAGNETIC RECORDING MEANS AND MAGNETIC RECORDING

SYSTEM

発明者: Mikio Matsuzaki, Koichi Shinohara, Tatsuo Shibata, Masashi Sahashi, Tomohiro Nozaki

権利者: TDK Corporation

種類: 特許

番号: U.S. Provisional Patent Application

Serial No.: 61/614,646

出願年月日: March 23, 2012

国内外の別: 国外(USP)

2. 名称: マイクロ波発振素子
発明者: 佐橋政司、土井正晶、今村裕志
権利者: 産業技術総合研究所
種類: 特許
番号: 特願 2008-280431
出願年月日: 手続補正書提出日: 2011年12月
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/sahashi/index>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐橋 政司 (SAHASHI MASASHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20361123

(2) 研究分担者

土井 正晶 (DOI MASA AKI)

東北学院大学・工学部電子工学科・教授

研究者番号: 10237167

三宅 耕作 (MIYAKE KOUSAKU)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20374960