

令和元年6月21日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04937

研究課題名(和文) 反強磁性金属を用いた反射器を有する静磁波共振子の研究開発

研究課題名(英文) Magnetostatic wave resonator with anti-ferromagnetic reflector

研究代表者

家形 諭 (Yakata, Satoshi)

福岡工業大学・工学部・助教

研究者番号：00585929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：スマートフォンに代表される移動通信デバイスの増加に伴って増大する情報通信を支えるためにはより高い周波数の電波利用が不可欠となっている。そのために高い周波数に対応した電波を選別するフィルタが必要となるが、現在用いられているフィルタはすでに限界を迎えており、新しい原理に基づいた新しいフィルタが必要とされている。本研究で提案する静磁波を用いたフィルタは従来のフィルタが抱える熱膨張の課題を解決できるポテンシャルを有しており、実現できれば通信量の大幅な増大と高速化を実現できる。本成果では強磁性金属媒体中を伝搬する静磁波の特性をより詳細にし、またIrMnを用いた新規静磁波反射器が有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気波はGHz帯の高周波で動作し、高速な通信デバイスへの応用が期待されているが、その制御方法がまだ確立されておらず、ほとんど実用化されていないのが現状である。本研究結果はこれまで知られていなかった静磁波の特性を明らかにした点で学術的な意義があり、また高速大容量通信を実現する静磁波デバイス実現へ一歩前進した点で社会的意義がある。特にIrMnを用いた静磁波反射器の提案は画期的であり、従来困難であった静磁波制御をより容易にする点で静磁波デバイス研究の進展に大きく貢献したと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Globally, the number of mobile device and data traffic increase drastically in recent decade. Utilization of higher frequency is one of the solution to support these explosive data traffic growth, however the signal filtering device, the SAW filter, couldn't handle higher signal over 2.5 GHz because due to thermal fluctuation. In this study, we suggest that noble MSW signal filter, which is more stable for thermal fluctuation and has high working range above GHz, utilizing IrMn, anti-ferromagnetic material, which can work as MSW reflector to control propagation of MSW in ferromagnetic media.

By the micromagnetic simulation we found that the IrMn works properly as MSW reflector works and the reflection rate can be manipulated by exchange coupled magnetic field induced by IrMn. Moreover it is found that there is a critical bias field which prevents MSW penetration even the media is continuous.

These result indicates the reflector utilizing IrMn achieves MSW control as desired.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 磁性 強磁性金属

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年のタブレット PC やスマートフォンに代表される移動通信デバイスの爆発的な普及により、モバイルデータトラフィックは年々増加しており、東京オリンピックを目前に控えた 2019 年には、2014 年の 10 倍である、24.3 EB(エクサバイト)を超えるデータトラフィックが 1 ヶ月で消費されることが予想されている。これら増加し続けるデータ通信量に対応するためには、使用する電波の周波数を高周波化し、通信トラフィックの大容量化、高速化を実現しなければならない。しかしながら、現在の通信に利用されている表面弾性波フィルタ(SAW)は 2.5GHz で物理限界をむかえるため、SAW に代わって 2.5 GHz 超で動作するフィルタ素子、の開発が喫緊の課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では磁気波である”静磁波”に注目し、SAW フィルタが抱える問題を解決する、静磁波フィルタを実現することを目的とする。

現在の SAW フィルタが 2.5 GHz 超の周波数に対応できないのは熱による体積の膨張が主な原因である。本研究で提案する静磁波は、弾性波とは異なり、「熱による体積変化の影響が少ない」、「固有振動数が GHz 帯域である」などの特徴を有しており、2.5 GHz 超の周波数に対応する次世代フィルタとして期待されている。

実際に静磁波を用いたフィルタを実用化するためには下記 4 点の課題を解決することが要求される。

- ①周波数選択的に静磁波の励起検出を行うこと
- ②静磁波反射器を構成すること
- ③静磁波吸収器を構成すること
- ④挿入損失を少なくすること

#### ①周波数選択的に静磁波の励起検出を行うこと

SAW フィルタ同様、静磁波を用いたフィルタでも電気信号を一度別の波に変換し、共振器によってフィルタリングを行った後、再び電気信号に変換する。SAW フィルタが電気信号を弾性波に変換するのに対し、静磁波フィルタでは電気信号を静磁波へと変換する。そのため静磁波を励起する(電気信号→静磁波)および検出する(静磁波→電気信号)を行うことが必要となる。申請者は楕円構造の電極を用いた静磁波の励起、検出をすでに実現しており、周波数選択的に静磁波の励起、検出を行うことができる。

#### ②静磁波反射器を構成すること

静磁波反射器を構成することおよび③の静磁波吸収器を構成することは静磁波フィルタ実現の鍵である。現状では静磁波の反射器は静磁波媒体の厚みを変え、段差を形成する方法以外に見当たらない。しかしながら段差を形成する方法では加工精度の問題と、本研究結果で説明するように、静磁波を 100% 反射させることはできない。静磁波フィルタがこれまで実用されていない主な原因が反射器の実現であると考えられる。本研究で提案する反強磁性材料 IrMn を用いた静磁波反射器は伝搬媒体の加工を必要とせず、また膜厚や熱処理によって反射率を最大 100% まで制御できる点が大きな利点であり、この特徴を用いることで静磁波フィルタを実現できると考えられる。

#### ③静磁波吸収器を構成すること

静磁波吸収器は現在のところ存在しない。有限サイズの共振器では端面における反射やエッジモードを起因とする不要な静磁波モードを除去する必要がある。本研究では Pt を静磁波媒体に接合することで静磁波吸収器を実現する。Pt はスピントロニクス分野においてスピンシンク(スピンを吸収する材料)として知られており、強磁性材料に接続するだけで、磁気緩和定数を増大させることが知られている。磁気緩和定数の増大は静磁波にも大きく影響し、他の磁気特性を変化させることなく、振幅を大幅に減衰させることが可能になる。申請者はシミュレーション上ですでにその効果を確認している。

#### ④挿入損失を少なくすること

挿入損失の低減はデバイスを実現する上で最も困難な課題である。現時点で考えられる解決策は新規材料の開拓および微細化である。損失の大半は静磁波が伝搬する媒体材料に起因するため、損失の少ない材料を用いることが 1 つの解決策となる。現在最も損失が少ないと考えられる材料は YIG(イットリウム鉄ガーネット)をベースとする材料である。しかしながら YIG ベース材料は大量生産に向かないこと、材料の加工が難しいことなど YIG を用いるうえでの課題が存在する。YIG は優れた材料であるが現段階では実用に向かない。YIG に変わる、安価で優れた特性をもつ材料の開拓が必要である。もう一つの案として微細加工によって共振器自体を小さく構成することが考えられる。静磁波伝搬距離を短くすることで、伝搬における損失を低減する。シミュレーション上では際限なく小さくすることは可能であるが、実際の実験と比較を行いながら微細加工による効果を見極める必要がある。

本研究では以上の課題を順に解決し、2.5 GHz 超で機能する静磁波フィルタを実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究はマイクロマグネティクスを用いたシミュレーションおよび実際に薄膜を作製し、磁気的特性を評価する2つのアプローチを並行して推進した。

#### 【マイクロマグネティクスを用いたシミュレーション】

マイクロマグネティクス・シミュレーションにはオープンソースで公開されている、mumx3 を利用した。シミュレーションにおけるセルサイズは  $10 \times 10 \times 10$  nm とした。NiFe の磁化は 800 emu/cc とし、ダンピングパラメータは 0.01 とした。交換結合係数は  $13^{-12}$  J/m とした。NiFe 薄膜全体のサイズは  $30 \times 7.5 \mu\text{m}$ 、厚さは 10nm~40nm の間で変化させ、その際、セルサイズは 10nm のまま、セル数を変更することで、厚さを変化させた。外部磁界 100 Oe を短手方向に印加し、NiFe 中心の 1 列に交流磁界 1000 Oe を 6 GHz の周波数で加え、静磁波を励起した。1000 Oe は比較的大きな磁界であり、実験で再現するのは困難であるが、今回は振幅の絶対的な値を評価するのではなく、相対的な減衰を評価するため、あえて視覚的な見やすさを考慮し、大きな交流磁界を採用している。NiFe/IrMn 接合領域の NiFe には上記のパラメータに加えて、短手方向にバイアス磁界による磁界を加えている。シミュレーション試料は周期的な構造ではないため、端面からの反射波も含め、データには含まれている。

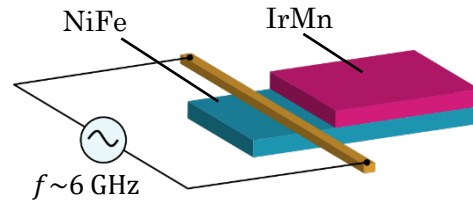


図1 マイクロマグネティクスシミュレーションに用いた試料モデル概要

【スパッタ法による NiFe/IrMn 膜の作製とその評価】  
超高真空チャンバーを作製し、DC マグネトロンスパッタ法を用いて NiFe/IrMn 薄膜を熱酸化膜 Si 上に成膜した。成膜時の到達真空度は  $5.0 \times 10^{-4}$  Pa。成膜時は Ar ガスを導入し、0.5 Pa の環境で熱酸化膜 Si 基板上に連続で NiFe および IrMn を磁界中成膜した。NiFe のみの試料、および NiFe/IrMn 接合の 2 種類を作製し、電子スピン共鳴装置を用いて強磁性共鳴スペクトルの測定および評価を行った。

超高真空装置を構成する真空部品およびその他消耗品は本研究費より支出された。超高真空装置は拡張性を持たせるため、基板準備室、搬送室および成膜室に分かれている。基板準備室には複数の基板を同時に設置できるため、真空引きの時間を短縮することが可能となっている。また搬送室にはトランスファーロードを用いず、ロボットアームを採用しているため、装置全体の小型化を実現している。搬送室には 6 つのポートが配置されているため、準備室を除き、最大 5 つの成膜室を接続することが可能となっている。材料ごとに成膜室を準備することで材料が混ざることなく再現性の高い膜の作製を可能としている。現段階では NiFe および IrMn の成膜室が完成しており、これらを利用して NiFe/IrMn 薄膜を作製した。

成膜によって得られた試料の強磁性共鳴スペクトルを電子スピン共鳴装置を用いて測定した。成膜時の試料サイズはおよそ  $10 \times 10$  mm であり、強磁性共鳴スペクトル測定用に  $5 \times 5$  mm にカットした。強磁性共鳴スペクトルの測定では、膜面内 NiFe 容易軸方向に磁界を印加するように試料をキャビティ内に設置した。励起周波数は X-band (およそ 9.5 GHz) を使用した。

### 4. 研究成果

#### 【マイクロマグネティクスを用いたシミュレーション】

申請者の過去の研究において NiFe だけの領域と IrMn/NiFe 接合領域の界面において静磁波の反射および屈折が起きることはすでに示されている。今回は IrMn のバイアス磁界の大きさに依存して、静磁波の伝搬がどのように変化するかをより詳細に調査した結果を報告する。

図 1 にシミュレーションに用いたモデル概要図を示す。NiFe 薄膜上の片端の領域に IrMn が接合されており、反対側の端から励起された静磁波は IrMn 接合領域へと向かって伝搬する。シミュレーションにおいて短手方向を容易軸としており、長手方向に励起用の交流磁界が印加されるため、励起される静磁波のモードは MSSW (表面静磁波) が支配的である。

図 2 に NiFe 中を伝搬する静磁波の伝搬距離依存性を示す。横軸は静磁波が励起されるアンテナからの距離であり、図中網掛けで表示されている  $3 \mu\text{m}$  以降の領域は IrMn が接合されている領域を表している。アンテナから伝搬する静磁波は IrMn の接合されている領域で急激に減衰、または反射する様子がみられた。減衰量は IrMn によるバイアス磁界が大きいほど減衰は大きくなった。バイアス磁界が 0.05 T のとき、IrMn 接合領域に侵入、伝搬する静磁波はみられなかった。また特徴的な振る舞いとして、IrMn 接合領域に侵入し伝搬する静磁波の波長がバイアス磁界の大きさに異なることも観測された。

IrMn 接合領域における静磁波の波長がバイアス磁界の大きさに依存して変化する原因として、①伝搬する静磁波の波長が IrMn 接合領域で変化した。②伝搬する静磁波には複数の波長の波が含まれており、減衰量が小さい波だけが通過できた。などが考えられる。これらを明らかにするため、NiFe 内における静磁波減衰比の周波数依存性を調べた。その結果を図 4 に示す。

横軸は静磁波励起アンテナからの距離を表しており、励起される周波数を 12.8, 6.0 および 4.0 GHz それぞれにおいてアンテナから伝搬する様子を示している。周波数の低い静磁波は周波数の高い静磁

波と比べて減衰量が少なく、より遠くまで伝搬できることわかった。周波数が異なることによる減衰量が異なる原因をより詳細に調べるため、周波数に依存した静磁波の伝搬速度の比較を行った。その結果を図5に示す。

図5に周波数に依存して変化する(a)波長および(b)伝搬速度をプロットした結果を示す。図中の丸はマイクロマグネティクスシミュレーションの結果であり、ラインは静磁波表面の分散関係から求めた計算結果を示している。シミュレーションの結果と計算結果は非常によく一致した。また周波数が低くなるに従い波長が大きくなっていること、および伝搬速度が早くなっていることがわかった。

これらの結果から周波数によって減衰量が異なるのは静磁波の伝搬速度が周波数によって異なることが主な原因であることがわかった。すなわち、伝搬速度の遅い波は遠くへ到達する前に減衰し、伝搬速度の早い波は減衰する前により遠くへ到達する。

以上の結果をふまえ、図2に示す結果を考察する。IrMnが接合された領域における静磁波の波長がバイアス磁界によって変化している原因として「②伝搬する静磁波には複数の周波数の波が含まれており、減衰量が小さい波だけが通過できた」と考えるのは正しくないことがわかる。なぜなら、高い周波数の波は低い周波数の波と比較して遠くに到達できないにもかかわらずバイアス磁界が0.01 Tのとき、高い周波数の波だけが遠くに伝搬しているからである。

結論を先に述べると、伝搬する静磁波の周波数はIrMnの接合される領域を伝搬する前と後で変化しておらず、波長と減衰量が変わっている。伝搬速度の違いがバイアス磁界中の静磁波の振る舞いを決めているのではなく、静磁波の分散関係によってバイアス磁界中の静磁波の振る舞いは決定されている。

図5に表面静磁波の分散関係の計算結果を示す。静磁波が励起される条件はバイアス磁界に依存している。バイアス磁界比較的大きい領域では周波数の低い静磁波は励起されない領域(網掛け部分)があることがわかる。また周波数が一定で、バイアス磁界を大きくしていった場合、波長が長くなり、バイアス磁界がある値以上になると、静磁波が分散関係から外れ、静磁波が存在できなくなってしまうことがわかる。今回のシミュレーションと同じ6 GHzの波に注目した場合、バイアス磁界が大きくなるに従い、波長は長くなり、さらにバイアス磁界がおおよそ400 Oe(0.04 T)を超えると、静磁波は存在できなくなってしまう。以上のことは図2の結果を矛盾なく説明することができる。

さらに、これらの結果は見方を変えれば、バイアス磁界を制御することで静磁波の伝搬をコントロールできることをも示している。伝播媒体NiFeが物理的に連続であったとしてもIrMnをNiFeの上に接続するだけで、100%静磁波の侵入できない領域を形成することが可能になる。これはNiFeの膜厚差を用いた静磁波反射器よりも優れた反射特性を示唆している。このことをより具体的に示すために、図6にNiFe中を伝搬する周波数6 GHzの静磁波の波長と

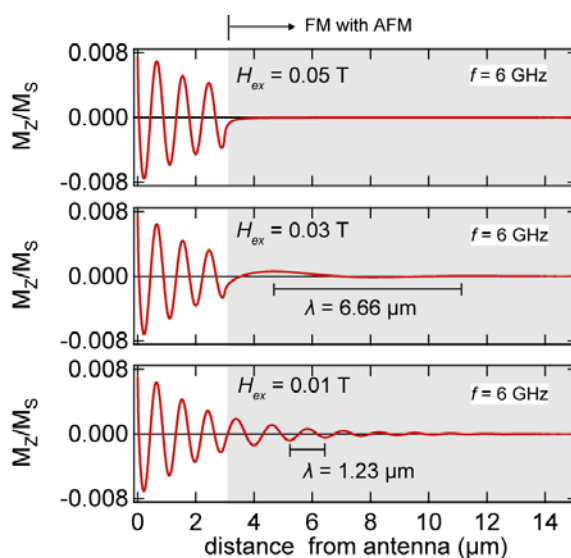


図2 アンテナから励起された静磁波がIrMnのないNiFeだけの領域からNiFe/IrMn接合の領域に伝搬する様子。

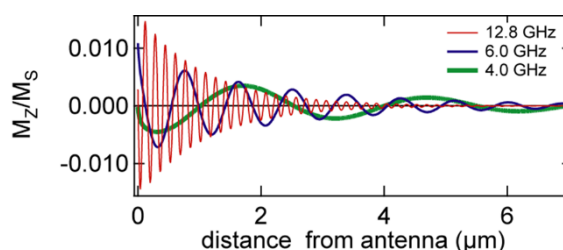


図3 静磁波伝搬の周波数依存性。

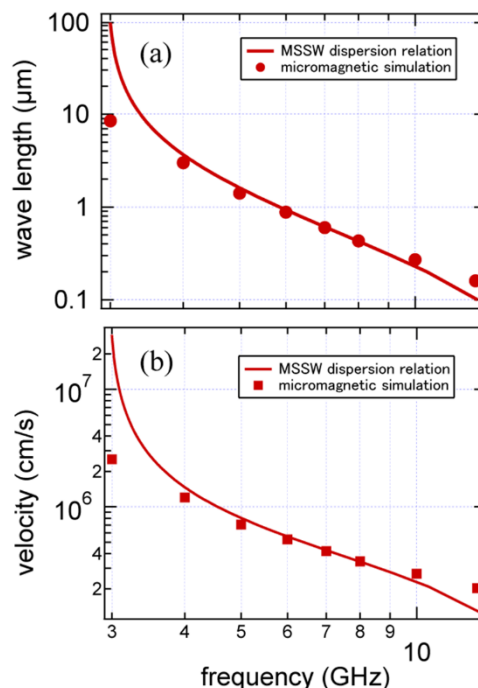


図4 NiFe中を伝搬する静磁波の(a)波長および(b)速度の周波数依存性。

NiFe 膜厚との関係を示す。丸印はマイクロマグネティクスシミュレーションの結果であり、実線は分散関係より計算した結果である。NiFe 膜厚が厚くなるに従い、波長は長くなった。これは NiFe 膜厚が厚い場合には波長の長い静磁波が透過し、NiFe 膜厚が薄い場合には波長の短い静磁波が透過できることを示している。段差を用いた静磁波反射器はこの特性を利用し、選択的な静磁波の反射を実現している。しかしながら、NiFe 膜厚を変えることで、静磁波の波長を選択的に伝搬することは可能であるが、NiFe 膜厚をどのように変化させても波長が変わるだけで、100% 静磁波を反射する条件を作り出すことはできない。すなわち段差による反射器では選択的な静磁波の透過を実現できたとしても、100% 静磁波を反射する反射器としての機能を持つことはできない。一方 IrMn を用いたバイアス磁界によって静磁波を制御する場合、バイアス磁界を制御するだけで、反射率を 0~100% の間で、NiFe 媒体を加工することなく、制御することが可能である。

図 7 に NiFe 中を伝搬する静磁波の波長とバイアス磁界の関係を示す。バイアス磁界が 100 Oe 以下の比較的小さな領域では静磁波の波長に大きな変化はみえないが、100 Oe 以上のバイアス磁界で静磁波の波長は急峻に増大し、400 Oe において波長は無限大になっている。これは 6 GHz の静磁波は 400 Oe 以上のバイアス磁界下では全く存在できないことを示している。すなわち、IrMn などの反強磁性磁界によってバイアス磁界を制御するだけで、反射率を 100% にすることが可能であることを示しており、この結果は図 2 の結果と一致する。

#### 【スパッタ法による NiFe/IrMn 膜の作製とその評価】

DC マグネトロンスパッタで作製した NiFe および NiFe/IrMn 薄膜の概要を図 8 に示す。成膜後、熱処理をせず、強磁性共鳴スペクトルの観測を行った。

NiFe および NiFe/IrMn 薄膜の強磁性共鳴スペクトルを図 9 に示す。スペクトル測定では NiFe にマイクロ波の交流磁界を印加しさらに外部磁界を掃引することでマイクロ波の吸収に伴うスペクトルを観測する。強磁性材料の磁化の大きさおよび内部磁界の大きさに対応した磁界強度でスペクトルが観測されるため、内部磁界の変化によってスペクトルが観測される磁界が変化する。IrMn によるバイアス磁界が NiFe に加えられた場合、共鳴時の掃引磁界はバイアス磁界の分だけ少なくて済むため、IrMn がある場合およびない場合の NiFe の強磁性スペクトルの共振磁界を比較することで、バイアス磁界の強度を測定することができる。

図 9 における高磁界側のスペクトルは NiFe だけの試料に対応し、低磁界側のスペクトルは NiFe/IrMn の試料に対応している。図に示した試料では 2 つのスペクトルの共振磁界の差は 72 Oe であった。すなわち、IrMn によるバイアス磁界が 72 Oe であることがわかる。IrMn は fcc 構造で比較的強いバイアス磁界を示すことが知られており、同じく fcc 構造の NiFe と合わせて用いられることが多い。今回 IrMn によるバイアス磁界が得られたことから、NiFe および IrMn が fcc 構造が優先して形成されていることがわかる。

IrMn 自体は熱処理を施さなくともバイアス磁界を NiFe に生じさせることが知られているが、熱処理を行うことで、より大きなバイアス磁界を形成することが可能であることが知られており、少なくとも 300 Oe までバイアス磁界を大きくすることが可能である。また膜の厚さが 4 nm 以下の場合、厚さに依存してバイアス磁界の大きさが変化することが知られているため、IrMn 膜厚だけで静磁波の伝搬特性を変化する

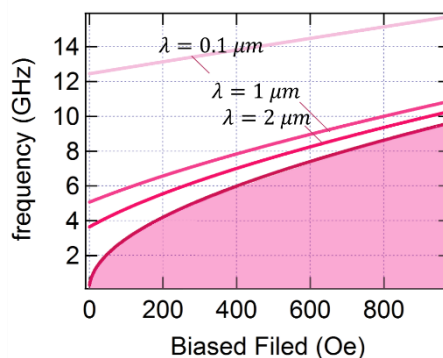


図 5 NiFe 中を伝搬する静磁波の分散関係。

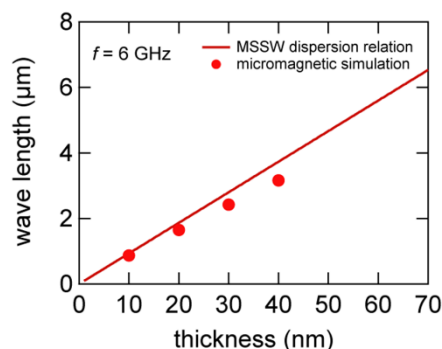


図 6 NiFe 中を伝搬する静磁波波長の NiFe 膜厚依存性

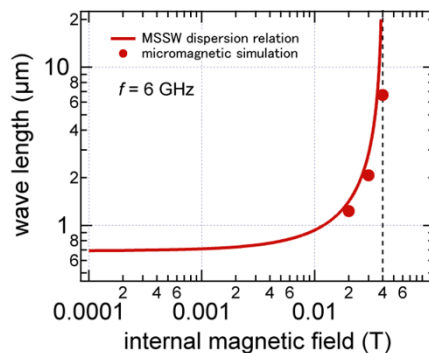


図 7 NiFe 中を伝搬する静磁波波長のバイアス磁界依存性。

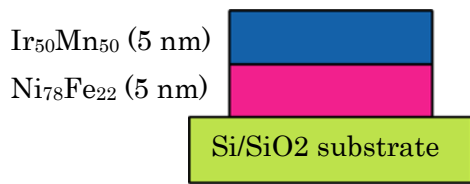


図 8 DC magnetron sputter を用いて 10X10mm の熱酸化膜付 Si 基板上に形成した NiFe/IrMn 膜の構成。

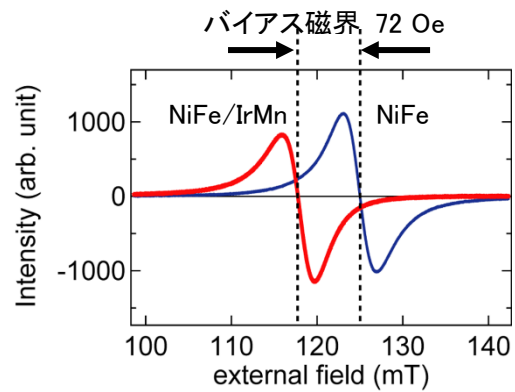


図 9 NiFe/IrMn 薄膜（低磁界側）および NiFe 薄膜（高磁界側）の強磁性共鳴スペクトル。

ことが可能である。

今後は NiFe 薄膜上に IrMn ストライプを複数配置し、静磁波反射器による共振器を構成する。また共振器の強磁性スペクトルを測定し、IrMn による静磁波の反射の実験的実証および共振器特性の評価を行う。共振スペクトルを測定することで、IrMn で挟まれた領域に立つ静磁波を特定することが可能であり、スペクトル強度や Q 値を評価することにより、より詳細に静磁波の振る舞いを知ることができる。

5. 主な発表論文等  
[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]  
ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究分担者  
なし

(2)研究協力者  
研究協力者氏名:  
なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。