

令和 5 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：2020～2022

課題番号：20K05308

研究課題名(和文)反強磁性金属を用いた静磁波共振器の開発

研究課題名(英文)Development of magnetostatic wave resonator with anti-ferromagnetic metal.

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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は静磁波を利用した高周波共振器の実現を目指して実施された。静磁波共振器の実現には静磁波を反射する機構が必要不可欠であり、本研究ではNiFe/IrMn界面に生じるExchange Biasを利用することで静磁波反射器を提案する。スパッタ法を用いて熱酸化膜付Si基板上にNiFe(10 nm)/IrMn(30 nm)を形成し、磁気特性や交換バイアス磁界のIrMn膜厚依存性などを評価した。また電子線リソグラフィーを用いて共振構造を形成し、強磁性共鳴スペクトルの観測を行った。静磁波励起に伴うスペクトルは観測されなかったが、試料の作製、加工および評価の段階で改善すべき課題を明確にすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IrMnなどの反強磁性材料と強磁性材料界面におけるExchange Bias Fieldはよく知られている。また静磁波、特に表面弾性波が強磁性材料を伝搬されることもよく知られているが、表面弾性波がExchange Bias Fieldにおいて静磁波の反射が生じるかどうかは実験的に知られていない。これを実験的に明らかにすることは学術的に意義があり、静磁波の反射を実現できれば静磁波デバイスへの応用が期待できることから社会的意義は大きい。本研究では実際にNiFe/IrMn多層膜を作製、加工および評価を実施しており、目的を達成するうえで課題を明確にした点は上記意義に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：For next generation mobile communication system we have proposed magnetostatic wave(MSW) resonator which has potential to make above 2.5 GHz signal filtering which current acoustic resonator cannot. The MSW resonator requires wave reflectors which we have suggested utilizing exchange bias field between NiFe/IrMn interface. MSW can not propagate through NiFe area to NiFe/IrMn area because magnetic field will be different due to exchange bias field. So far, we have demonstrated MSW reflection at the border with different magnetic field using micromagnetic simulator. In this time, we have developed NiFe(10 nm)/IrMn(30 nm) bi-layer on thermal oxidized Si substrate using DC magnetron sputtering method and fabricated electron-beam lithography to form MSW resonator. Eventually, we couldn't confirm the resonant spectrum due to MSW excitation, however, the process from making to evaluating cleared the issues which is the strength of exchange bias field and process of fabrication.

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 静磁波

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンに代表される移動通信デバイスの通信トラフィック量は年々増加し、2021年には月間トラフィック量が48.3 EB(エクサバイト)に達すると見込まれている。今後増大し続ける通信トラフィックを支えるために、より高い周波数に対応できる信号フィルタを実現することが必要不可欠である。現在の移動通信デバイスに用いられている表面弾性波(SAW)フィルタ素子は電気信号を一度表面弾性波に変換することで低い挿入損失や狭い遷移幅など非常に優れた機能を実現している。しかしながら2.5 GHzで限界を迎えるため、次世代移動通信で予定されている6 GHz超の周波数帯域を利用するためにはSAWに代わる新しい高性能フィルタ素子の実現が喫緊の課題となっている。

2. 研究の目的

共振周波数が制御された静磁波共振器を実現することで2.5GHzを超える高い周波数に対応した次世代フィルタ素子の実現を目指す。静磁波共振器を実現するためには静磁波を反射する機構が必要不可欠であり、本研究ではIrMnを静磁波反射器として利用することを提案する。反強磁性材料であるIrMnはNiFeなどの強磁性材料界面でExchange Biasを生じることが知られており、これを利用して局所的なバイアス磁界を生成する。伝搬する静磁波は励起条件の異なる局所的に磁界がバイアスされた領域へ侵入できないため、結果として磁界がバイアスされた領域界面で静磁波は反射する。申請者は過去にマイクロマグネティクスシミュレーションによって磁界がバイアスされた領域界面で静磁波が反射の様子を観測している。今回はシミュレーションではなく、試料の作製、加工および評価までを実施する。より具体的には、静磁波を伝搬する媒体としてNiFeを採用し、その上にIrMnを微細加工にてパターンニングし、局所的な磁気バイアスが伝搬および励起される静磁波への影響を電子スピン共鳴装置を用いて観測する。

3. 研究の方法

【成膜条件】

DCマグネトロンスパッタ法を用いて熱酸化膜付きSi基板上にNiFe(10-100nm)およびIrMn(0-30nm)の成膜を行った。NiFeおよびIrMnターゲットの組成はそれぞれNi₈₀Fe₂₀(atom%)およびIr₂₅Mn₇₅(atom%)とした。真空チャンバーの到達真空度は 7.0×10^{-5} Pa。成膜時はNiFeおよびIrMnともにArガスを導入し、真空度0.5 Paの環境において投入電力50 Wで磁界中成膜を行った。

【VSM(振動型試料磁力計)による磁化および保磁力の測定】

成膜されたNiFeおよびNiFe/IrMn多層膜の飽和磁化および保磁力をVSMで測定した。同時にNi標準試料のVSM測定を行い、測定結果の校正を行った。

【EDS(エネルギー分散型X線分光法)による元素分析】

VSMによる磁気特性を測定した試料の一部をランダムに抽出し、EDSを用いて組成分析を行う。不純物の割合や成膜されたNiFe組成の母材からのずれなど調査する。

【加工時の界面暴露の影響】

NiFe上にIrMnをパターンニングする方法は2つ。1つはNiFe/IrMnを成膜後、電子線リソグラフィでパターンを形成し、一部のIrMnをミリングする方法。もう一つはNiFe成膜後に電子線リソグラフィでパターンを形成し、IrMnを成膜後リフトオフする方法。前者のIrMnをミリングする方法はNiFe/IrMn界面を大気にさらすことなく正常な界面を形成できる一方、NiFe/IrMn界面でミリングを止めることは難しく、NiFeを一部削る、またはIrMnを削り残すことになる。一方リフトオフによるパターン形成はIrMnだけを除くことが可能であるが、電子線リソグラフィでパターンを形成する際にNiFe表面が大気にさらされてしまい、IrMnによる磁気バイアスが損なわれてしまう可能性がある。そこでNiFeを成膜後大気に1分程度放置し、その後IrMnを成膜した。大気に暴露せず連続製膜したNiFe/IrMn多層膜と磁気バイアスの変化を比較した。

【反強磁性材料のバイアス磁界のIrMn膜厚依存性】

IrMnによる磁気バイアスはIrMnの膜厚に依存して大きくなることが知られている。NiFe/IrMnの磁気バイアスをVSMで得られる磁化曲線から測定し、IrMnの厚さと磁気バイアスの関係を明らかにする。

【電子線リソグラフィを用いた微細パターンニング】

静磁波共振器を実現するためには静磁波を閉じ込める領域を形成する必要がある。本研究ではNiFe上にIrMnを配置し、形成される局所磁気バイアスを静磁波反射器として利用する。そのため、電子線リソグラフィを用いた微細パターンニングによりIrMnで囲われた領域を形成する。共振状態を実現するためにはIrMnで囲われた領域は静磁波の波長程度の距離が必要となる。本研究の過去のシミュレーションによれば、周波数を一定(例えば9.5 GHz)とした場合、その大きさはおよそ100~1000 nmである。今回はNiFe/IrMn多層膜を形成し、その上に電子線リソグラフィを用いてパターンを形成する。電子線レジストには日本ZEON社製:ZEP520Aポジレジストを使用した。静磁波励起に伴うエネルギー吸収スペクトルをできるだけ観測しやすくするためできるだけ多くのパターンを配置した。具体的には幅500 nm長さ4 mmのパターンを5.5 μm間隔で800個配置し、さらにこれを2x2のアレイ上に配置した。

パターンニングされた試料から IrMn をミリングする。ミリングには GD-OES (グロー放電発光分析法) を利用する。NiFe/IrMn 多層膜において IrMn だけをミリングするために、Mn による発光強度に注目し、ミリング時間を設定した。ミリング領域は直径 4 mm である。Ar ガス圧力を 200 Pa、電力を 10 W、ミリング時間を 12 秒とした。

【電子スピン共鳴装置を用いた強磁性共鳴スペクトルの観測】

GD-OES にて IrMn をミリングした後、基板を約 5×5 mm サイズにカットし、ミリング領域だけを取り出した。電子スピン共鳴装置を用いた強磁性共鳴スペクトルを観測した。マイクロ波周波数は X-band (9.45 GHz)、Modulation 周波数を 100 kHz とした。

4. 研究成果

【VSM による磁化および保磁力の測定】

DC マグネトロンスパッタ法を用いて NiFe (100 nm) を熱酸化膜付き Si 基板上に成膜し、VSM を用いて磁化曲線を測定した結果を図 1 に示す。磁界は膜面内容易軸方向に印加した。飽和磁化は 692 emu/cc、保磁力は 4.1 Oe であった。飽和磁化および保磁力は試料とスパッタ源からの距離、Ar ガス圧力、投入電力に依存して変化が見られた。特に Ar ガス圧が保磁力に与える影響は顕著であった。現時点で断言できないものの、ガス圧力に違いに伴って弾道的または拡散的にスパッタされるかどうかは膜の形成に影響している可能性がある。スパッタ源からの距離 2 cm、投入電力 50 W および Ar ガス圧力 0.5 Pa において最も小さな保磁力は 4.1 Oe が得られた。以降の試料は上記と同条件で NiFe の成膜を行う。

【EDS による元素分析】

ガラス基板上に NiFe を 44 nm 成膜し、EDS による元素分析を実施した。Fe、Ni に加えてガラス基板に起因する Si、O、B が検出され、その他の不純物は検出されなかった。また Ni の atom% は Fe の 5.29 倍であることが分かった。マグネトロンスパッタに使用した NiFe ターゲットは Ni₈₀Fe₂₀ (atom %) であるため、スパッタによって Fe の割合が減少していることがわかった。

【反強磁性材料のバイアス磁界 IrMn 膜厚依存性】

熱酸化膜付き Si 基板上に NiFe (10 nm)/IrMn (0-35 nm) を作製し、VSM を用いて磁化曲線およびバイアス磁界に起因する磁界のオフセットを測定した。図 2 にバイアス磁界の IrMn 膜厚依存性を示す。IrMn 膜厚を厚くするに従いバイアス磁界は増加し、最大 11.2 Oe のバイアス磁界が得られた。次に熱酸化膜付き Si 基板上に NiFe (10 nm) を成膜し、一度大気に最大 1 分ほど暴露した後、再び真空チャンバー内にもどし、IrMn (0-30 nm) を成膜した。VSM を用いて磁化曲線およびバイアス磁界に起因する磁界のオフセットを測定した。一度大気暴露した試料は全体的にバイアス磁界が比較的小さく、その大きさは最大でも 1.2 Oe 程度であった。以上の結果より、NiFe 上に IrMn をパターンニングする際、NiFe/IrMn 間の磁気バイアスを保つためには NiFe と IrMn を連続成膜しなければならないことがわかった。NiFe と IrMn を連続成膜した後に電子線リソグラフィでレジストパターンと形成し、その後 Ar ミリングにより IrMn を削るプロセスを採用する。

【電子線リソグラフィを用いた微細パターンニングおよび GD-OES によるミリング】

熱酸化膜付き Si 基板上に NiFe (10 nm)/IrMn (30 nm) を作製し「3. 研究の方法」記載の方法で幅

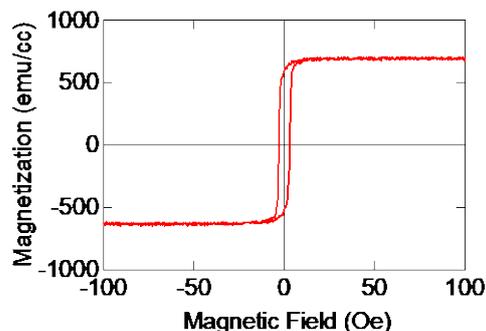


図 1 NiFe (100 nm) の磁化曲線。成膜時の Ar ガス圧力をできるだけ小さくすることにより、保磁力の比較的小さな特性が得られた。

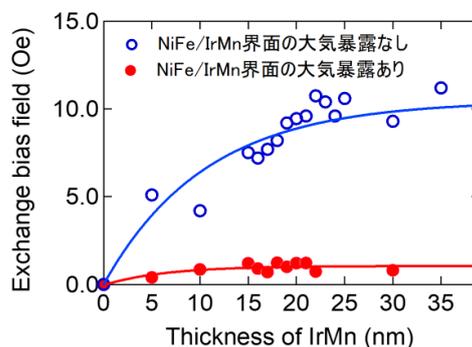


図 2 NiFe (10 nm)/IrMn におけるバイアス磁界の IrMn 膜厚依存性。NiFe/IrMn 界面が大気に暴露されることでバイアス磁界は顕著に低下する。

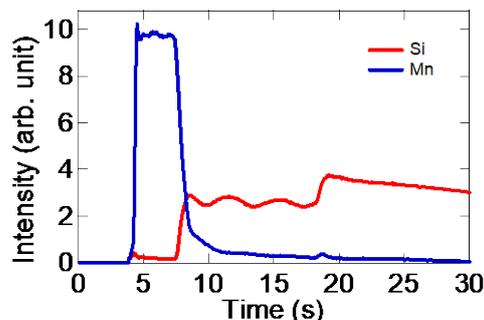


図 3 熱酸化膜付き Si 基板上の IrMn (30 nm) における GD-OES 発光強度測定。Mn のミリングが観測され、その後基板の Si がミリングされている様子が明瞭に観測された。

500 nm 長さ 4 mm のパターンを複数形成した。パターンニング面積が小さく、リアルタイムでミリング深さをモニタリングできないため、熱酸化膜付き Si 基板上に IrMn(30 nm) を作製し、30 nm の IrMn を削るために必要な時間を測定した。図 3 にミリング中の Mn と Si の発光強度を示す。ミリング開始直後から Mn の発光が観測され、その後明瞭に Mn から Si への発光へ切り替わる様子が観測された。Mn の発光が十分小さくなる時間を複数の試料で複数回測定し、その平均値をミリング時間 (12 秒) として設定した。電子線リソグラフィにてパターンニングされた NiFe(10 nm)/IrMn(30 nm) を GD-OES にて 12 秒ミリングした。図 4 にその結果を示す。おおよそ直径 4 mm の範囲でミリングに伴う変色が観測された。変色部分を 5×5 mm ほどの大きさで切り出し、電子スピン共鳴装置を用いて強磁性共鳴スペクトルを観測した。図 5 に得られたスペクトルの結果を示す。1000 Oe 付近に観測された強磁性共鳴スペクトルは一様モードの励起に起因するスペクトルであり、静磁波の励起に伴うスペクトルは観測されなかった。IrMn による静磁波の反射が機能した場合、1000 Oe より低い磁界にてスペクトルが観測されることが予想される。今回スペクトルが観測されなかった原因として IrMn により磁気バイアスが不十分であったこと、ミリング時間が不十分であったことなどが可能性として考えられる。今回用いた NiFe(10 nm)/IrMn(30 nm) の磁気バイアスはおおよそ 10 Oe 程度と過去に報告されている例と比較して低い値となっている。Ta などの NiFe 下地層、ポストアニールおよび NiFe および IrMn ターゲット組成の検討などを行うことでより大きな磁気バイアスを実現する。今回パターンニングされていない IrMn(30 nm) をミリング時間算出のために用いたがパターンニングされた試料のレジスタ残渣や狭いミリング領域に起因して、IrMn をミリングする時間が不十分であった可能性が考えられる。本研究では試料の作製、加工および評価の一連のプロセスを確立することができた。またこれらを通して静磁波共振器実現に向け解決すべき課題、磁気バイアスの向上や加工精度の課題、などが明確になった。

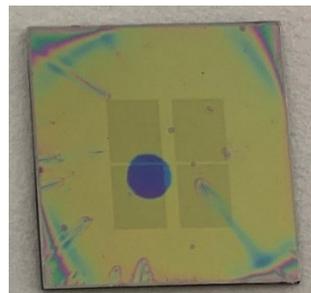


図 4 熱酸化膜付き Si 基板上の NiFe (10 nm) /IrMn(30 nm) に形成されたパターン (500 nm × 4mm の配列) と GD-OES によりミリング痕。

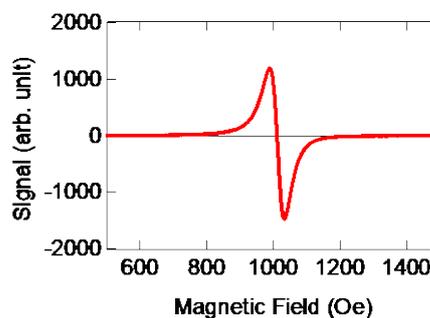


図 5 NiFe (10 nm) /IrMn(30 nm) における強磁性共鳴スペクトル。一様モードのスペクトルのみ観測され、静磁波励起に伴うスペクトルは観測されていない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大杉直也、家形諭
2. 発表標題 NiFe/IrMn界面の大気暴露による結合強度への影響
3. 学会等名 2022年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------