

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02147

研究課題名（和文）局所磁気特性制御技術及びその計測手法の確立と高機能薄膜磁気デバイスへの適用

研究課題名（英文）Establishment of technology to control local magnetic properties and its measurement method and its application to functional thin-film magnetic devices

研究代表者

菊池 弘昭（Kikuchi, Hiroaki）

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：30344617

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：局所的に電流を印加して加熱するジュール加熱の薄膜への適用性を検討して、温度制御の可能性を明らかにした。続いて、ジュール熱発生のために印加する電流が作る局所磁界と永久磁石による一定磁界を組み合わせた局所磁気飽和技術と融合させることで、局所領域の磁気異方性制御技術が可能であることを明らかにした。その技術に基づき、薄膜磁気インピーダンス素子を例に、簡便な磁気異方性制御技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜磁気デバイスにおける磁気異方性の制御は、成膜時あるいは、基板上で一方向の制御に限られていたが、本研究成果は装置構造の工夫により任意の方向に異方性を付与できることを示したものであり、磁気デバイス作製法に新たな可能性を与える。また、一方向に制御の場合においては、高真空で大電力を消費し、長時間で大型炉を必要としたのに対して、本成果はコンパクトなポータブルな装置提供を可能にし、消費電力も極めて少なくて済み、工業応用上インパクトのある成果である。

研究成果の概要（英文）：The applicability of Joule heating by applying a local electric current to magnetic thin films was investigated to clarify the possibility of controlling temperature. Then, by combining the local magnetic saturation technique, which combines the local magnetic field generated by the current applied for Joule heating and the magnetic field by permanent magnets, it was clarified that the magnetic anisotropy can be controlled in the local region is possible. Based on this technique, we examined a simple magnetic anisotropy control technique using thin-film magnetic impedance elements as an example and successfully performed.

研究分野：磁気応用工学

キーワード：磁気異方性 磁気薄膜 局所制御 磁気デバイス

## 様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

磁性材料にはその方向により特性が異なる磁気異方性が存在し、薄膜では一軸磁気異方性を示すものが多い。薄膜磁気デバイスではその異方性を局所的に自在に制御できると多機能・高性能化に繋がる。しかし、局所的な磁気異方性制御の事例は当時なく、磁性材料の持つポテンシャルを最大限には生かしていなかった。一方、アモルファス磁性薄膜は磁界中熱処理により異方性を一方向に制御する事例は存在した。ただし、その場合、大型の炉が必要であり、磁界印加コイルに流す電流や温度を高温にするために数 10A の電流印加が必要であり、かつ長時間を要し真空系の構築も不可欠であった。よって、長時間で高コストになるデメリットが存在した。

### 2. 研究の目的

本研究では、磁性薄膜に対し局所的に電流を印加した場合のジュール加熱を基本とし、温度制御の可能性を検討し、ジュール熱発生のために印加する電流が作る局所磁界と永久磁石による一定磁界を組み合わせた局所磁気飽和技術と融合させることで、局所領域の磁気異方性制御技術の実現を目的とした。その技術に基づき、薄膜磁気インピーダンス素子を例に、簡便な磁気異方性制御技術の構築を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 磁場を印加しながらのジュール加熱

ジュール加熱のための電流はインピーダンス計測に使用しているウェハープローブにより供給した。素子形状が数 $\mu\text{m}$ 厚、幅も数 10~100 $\mu\text{m}$  であるため、印加電流としては最大で 150mA 程度とした。磁場は専用の治具を作製して永久磁石(NdFeB 磁石)を用いて印加した。図 1 にその様子を示す。ジュール加熱は大気中で行った。

#### (2) 温度見積と磁気インピーダンス計測

直接的な温度計測は困難なため、有限要素法解析で温度の見積を行った。磁場印加しながらのジュール加熱をした試料の磁気インピーダンス効果についてネットワークアナライザを用いて評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 結晶化条件

アモルファス材料は結晶化温度に達すると、結晶化して軟磁気特性を示さなくなり磁気異方性制御が困難となる。ここでは、磁気インピーダンス効果において最も高感度が期待できる場合の異方性を磁場中熱処理により付与した素子に対して、素子長手方向にヘルムホルツコイルで 350e の磁界を印加しながらジュール加熱を行った。ジュール加熱後に周波数 100MHz において磁気インピーダンスを測定した結果を図 2 に示す。図 2(a)は幅 20 $\mu\text{m}$  素子の結果であるが、ジュール加熱前には磁界 16.90e でインピーダンスはピークを取っている。電流値が 60mA で無磁界のジュール加熱を行った場合、インピーダンスに変化は見られなかった。一方、60mA であるが磁界を印加した場合、12.70e へとピーク位置がシフトし、インピーダンス変化を確認できた。この場合、インピーダンスのピークは異方性磁界において生じることがわかっており、磁化容

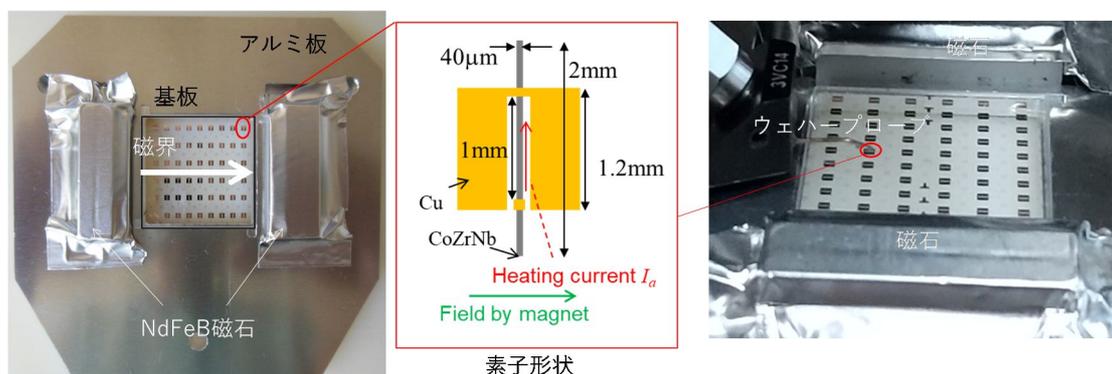
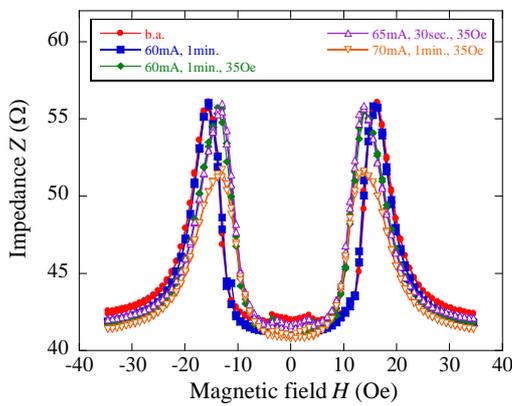
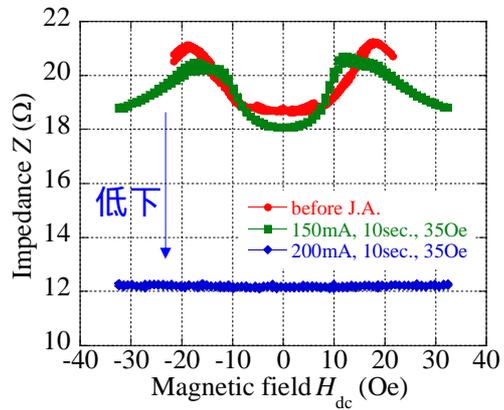


図 1 磁石による磁場印加を用いたジュール加熱の構成

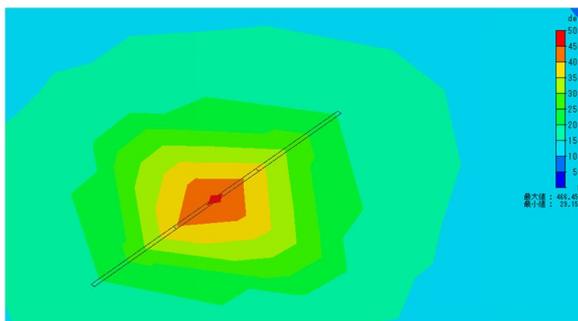


(a) 20 $\mu$ m 幅素子

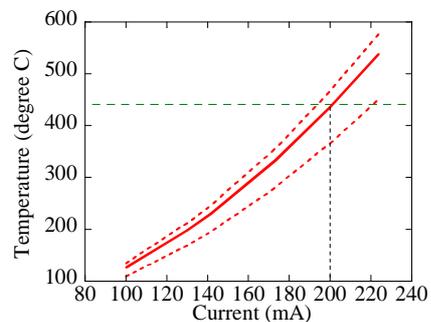


(b) 40 $\mu$ m 幅素子

図2 インピーダンスの外部磁界依存性 (周波数 100MHz)



(a) 温度分布



(b) 温度の電流値依存性

図3 有限要素法により伝熱解析(幅 40 $\mu$ m 素子)

易軸と異なる方向に磁界を印加しながら加熱したため、異方性の強度が弱まりピークが低磁界側にシフトした可能性がある。ジュール加熱によりインピーダンス変化を生じることが確認できた。図2(b)は同様の検討を幅 40 $\mu$ m の素子に対して行った結果である。電流値 150mA で磁界を印加した場合、インピーダンスのピーク位置がシフトすることを確認できた。200mA まで上げると、わずか 10 秒の加熱であるが外部磁場に対する変化を確認できなくなった。これは、結晶化によるものである。アモルファス構造の場合、結晶構造と比べて抵抗率が高くなる。よって、ジュール加熱前の磁場印加 0 でのインピーダンスは 18 $\Omega$ であったが、200mA 印加後には 12 $\Omega$ と磁場 0 でのインピーダンスが 6 $\Omega$ 低下していることも結晶化を生じていることを支持する結果である。図3は、実験に使用した試料と同等のサイズを有するモデルを用いて、有限要素法により伝熱解析を行い、電流値に対する素子温度を計算した結果である。(a)が温度分布であり、(b)が温度の印加電流依存性である。(a)より温度分布を生じることがわかり、(b)における実線は平均値、点線はそれぞれ最大・最小値である。200mA の印加では素子温度は 366-465 となり、これは素子の一部において用いた材料の結晶化温度に到達することを意味している。

## (2) ジュール加熱を用いた異方性制御

図3は、素子作製直後及び図1に示す治具を用いて素子幅方向に磁界を印加してジュール加熱した素子のインピーダンス及びインダクタンス変化分の外部磁界依存性を示した図である。外部磁界 0 のときの値を基準として変化分を算出している。測定周波数は 100 MHz とした。作製直後の素子においては、印加磁界 0 のときにインピーダンスは最大であり、印加磁界 20 Oe で 1 $\Omega$ 程インピーダンスは低下した。インダクタンスも同様に 2 nH 程度低下する。この特性は、素子の長手方向に磁化容易軸を有する場合の典型的なインピーダンス変化であり、成膜時に異方性が形成される可能性もあるが、ここでは、素子の形状磁気異方性で長手方向に磁化容易軸が形成されているものとする。いずれにしてもこのセンサで必要とされる幅方向に容易軸が形成されている状態ではない。また、80 mA の電流印加後には、わずかに変化量が低減したが特性に大きな変化は見られなかった。90 mA においては、定性的に大きな変化が観測された。磁界を印加すると一度、インピーダンス・インダクタンスは増加しピークを取った後減少した。加熱

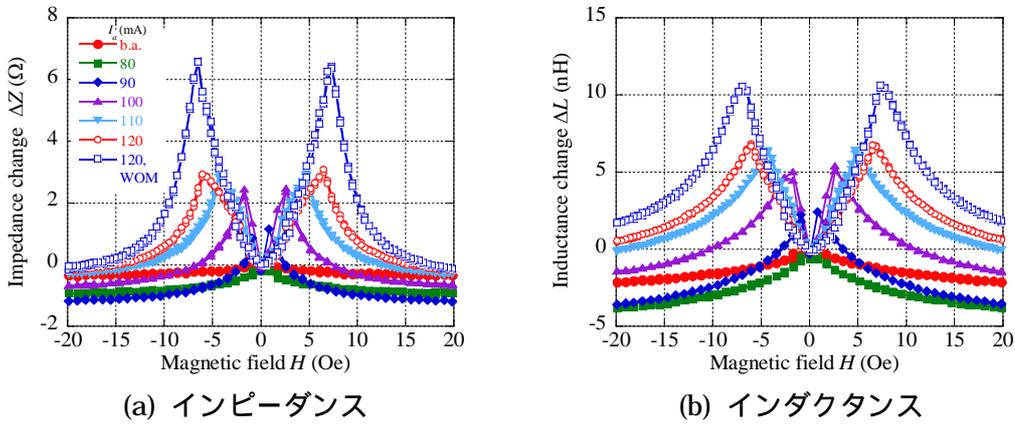


図3 インピーダンスの外部磁界依存性 (周波数 100MHz)

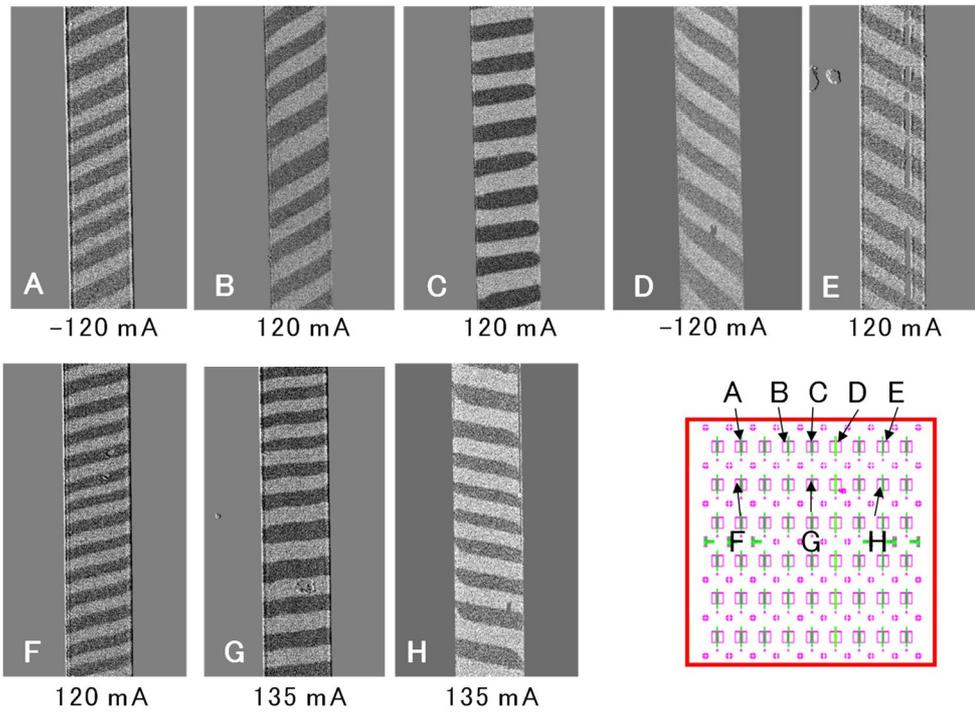


図4 基板の各位置でジュール加熱を行った際の素子の磁区構造

する電流値を増加させていくと、インピーダンス、インダクタンスがピークを取る磁界強度は増加していき、ピーク値は微増する傾向を示した。なお、120 mA で加熱を行った後に、磁石による磁界を印加せずに加熱を行ったところ、ピークを取る磁界強度は微増し、ピーク値は大幅に増加した。具体的には、増加分がインピーダンスは  $3 \Omega$ 、インダクタンスは、 $5 \text{ nH}$  程度であった。なお、ジュール加熱は1回あたり60秒の加熱を行い、それを同じ素子に繰り返し行った。以上の結果から、永久磁石とジュール加熱とを組み合わせた簡便な方法で素子の磁気異方性を制御できることを確認した。また、検討は大気中で行ったが、60秒程度の短時間の繰り返しでは酸化による顕著な特性劣化は確認できなかった。加熱時間については、60秒程度で十分なことも別途確認した。

図4は、基板上の素子の位置を変えて、ジュール加熱を行い、その時の磁区構造を観察した結果である。素子の位置に応じて、異方性磁界の向きが異なっている。これは、使用している磁石の配置では、基板上で磁界方向に分布を持つためであり、言い換えるとジュール加熱により磁界印加方向に揃ってきちんと磁気異方性が誘導できていることを意味している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Kikuchi, A. Ueno, M. Tanii	4. 巻 58
2. 論文標題 Controlling the magnetoimpedance property of thin-film elements using Joule heating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3151985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 菊池弘昭, 上野明統, 谷井雅	4. 巻 MAG-21-164
2. 論文標題 薄膜磁気インピーダンス素子におけるジュール加熱を用いた簡易な磁気異方性制御	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 61-64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Kikuchi, Y. Urakawa, M. Tanii	4. 巻 539
2. 論文標題 Changes in properties of thin-film magnetoimpedance element by Joule heating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 168356/1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmmm.2021.168356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 谷井雅, 菊池弘昭	4. 巻 MAG-21-131
2. 論文標題 MHzからGHz帯で数100%のインピーダンス変化率を有する磁性薄膜微細素子	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 51-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H. Kikuchi, A. Ueno, M. Tani i
2. 発表標題 Controlling of magnetoimpedance property of thin-film element using Joule-heating
3. 学会等名 Joint MMM/Intermag Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊池弘昭, 浦河芳樹
2. 発表標題 ジュール加熱による薄膜磁気インピーダンス素子の特性変化
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD33)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊池弘昭, 上野明続, 谷井雅
2. 発表標題 薄膜磁気インピーダンス素子におけるジュール加熱を用いた簡易な磁気異方性制御
3. 学会等名 マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷井雅, 菊池弘昭
2. 発表標題 MHzからGHz帯で数100%のインピーダンス変化率を有する磁性薄膜微細素子
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷井雅, 菊池弘昭
2. 発表標題 小型化した単層薄膜磁気インピーダンス素子の变化率
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Kikuchi, Y. Urakawa, M. Tanii
2. 発表標題 Changes in property of thin-film magnetoimpedance element by Joule heating
3. 学会等名 JEMS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------