

# 磁性細線の幅方向の磁気異方性の導入およびその磁区構造

## Domain configurations in magnetic wire with transversal magnetic anisotropy

池田智彦・馬闌・新井遼真・森迫昭光・劉小晰

信州大学工学部電子情報システム工学科,長野県長野市若里4丁目17-1 (〒380-8553)

Tomohiro Ikeda, Chuang Ma, Ryoma Arai, Akimitsu Morisako, and Xiaoxi Liu

Department of Electronic Information Systems Engineering, Shinshu University, 17-1, Wakasato 4, Nagano, 3808553, Japan

In this study, FeCo magnetic wires with different widths were fabricated by photolithography and facing targets sputtering. Specifically, the domain configurations in the magnetic wires were studied. Flux closure domains with both 90° and 180° domain walls were found in magnetic wire with uniaxial transversal magnetic anisotropy. Furthermore, when the uniaxial transversal magnetic anisotropy was increased, a dramatic increase of 180° domain walls was found in the magnetic wire. These results suggest there are potential for applications for magnetic wires in stress-induced magnetic domain wall motion devices.

**Key words:** magnetic wire, domain wall, magnetic anisotropy, magnetic domain structure

### 1. はじめに

近年、情報化社会の急激な進歩に伴い、画像情報をはじめとするデジタル情報が大幅に増加しており、高速大容量の記憶記録デバイスの開発が急務とされている。このような理由からレーストラックメモリやスピントリニクスに関する研究が注目されている。これらの研究の基本は、磁性細線上の磁壁を電流<sup>3,4)</sup>或いは外部磁界により制御することである。これらは磁気センサー<sup>5)</sup>をはじめ、幅広い分野へ応用されることが期待されるため磁性細線上の磁区構造の研究は、非常に重要であると考えられる。

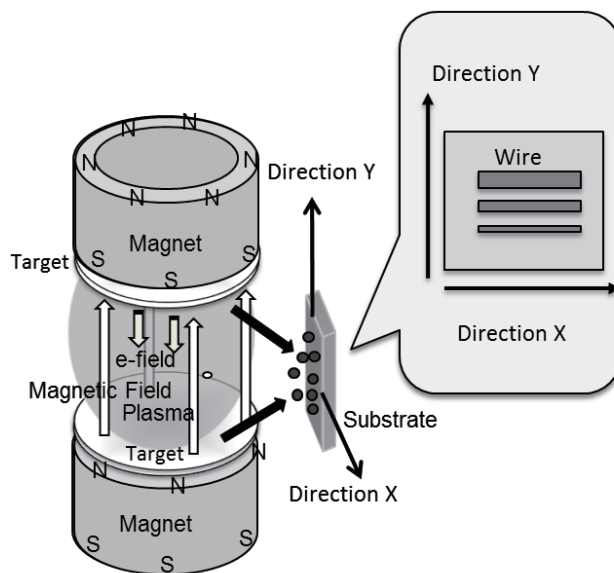
これまでの主な研究では、磁性細線上の磁気異方性の方向は大きく分けて二種類に分類することができる。一つは軟磁性細線の面内長さ方向に磁化容易軸を付与したものである。二つ目は垂直磁化膜<sup>6)</sup>である。垂直磁気異方性による面直方向の磁区構造は極めて安定であり、例えば磁気記録における面内長手方向に比較して垂直記録では高記録密度でも記録磁化は安定に存在できる。<sup>7)</sup>

軟磁性細線中では、形状磁気異方性の影響により、磁壁部を除く細線中の磁化の方向は細線長手方向に揃う傾向にある。一方、FeCo 等合金薄膜で、面内一軸異方性<sup>8)</sup>が報告されている。本研究では、FeCo 薄膜の面内一軸異方性を利用し、磁性細線の面内幅方向に磁気異方性を導入し、磁区及びその磁区構造と面内一軸異方性磁界の関係を検討した。

### 2. 実験方法

対向ターゲット式スパッタリング (Facing Targets Sputtering, FTS) を用い多結晶 FeCo 薄膜をガラス基板上に成膜し、フォトリソグラフィにより、磁性細線を形成した。

洗浄したガラス基板にフォトリソ液を垂らし、スピンドクターでレジスト膜を形成した。次に露光装置を用いて、ガラス基板上のレジスト膜を形成した。次に FTS を用いて、磁性薄膜を堆積し、リフトオフ法による磁性細線を形成した。磁性細線の長さは約 0.9 mm とした。また、2~20 μm の幅の細線を形成して、その細線幅と磁区構造の関係を調べた。

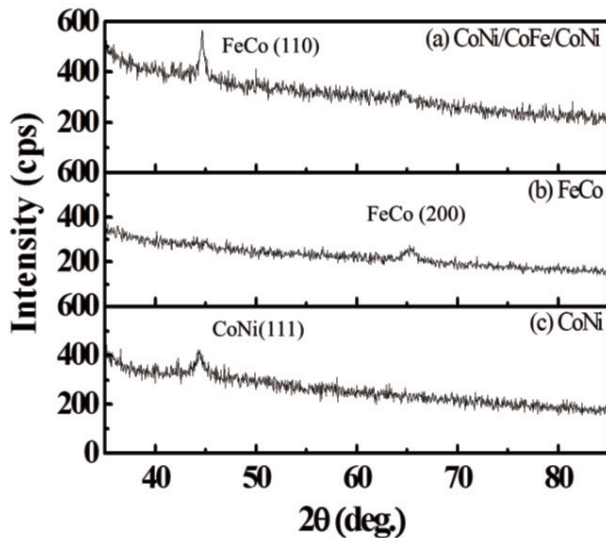


**Fig. 1** Schematic illustration of FTS and magnetic wire on glass substrate.

FTS での薄膜形成過程では、Fig. 1 に示すように基板を配置した。FTS による薄膜の堆積は  $1.4 \times 10^{-6}$  Torr 程度まで排気し、Ar ガス圧を  $1.5 \times 10^{-3}$  Torr として行った。ガラス基板の温度は室温とした。また、ガラス基板を配置した位置には (Fig. 1 の Y 方向) 約 30 Oe の磁石からのもれ磁界がある。

これまでの研究で、下地層を用いて FeCo 薄膜の粒子サイズの低減及び保磁力の低減、軟磁性改善の報告<sup>9,10)</sup>がある。本研究では厚さ 3 nm の CoNi の下地層を導入した。FeCo 薄膜の膜厚は 30 nm とした。更に、FeCo 層の酸化防止のため、2 nm の CoNi キャップ層を成膜した。

磁性細線の一軸異方性の大きさの温度依存性を検討するために 150~300 °C、 $1.0 \times 10^{-6}$  Torr で 30 分間熱処理を行った。



**Fig. 2** XRD profiles, (a)CoNi(2 nm)/FeCo(30 nm)/CoNi(3 nm)/sub. (b) FeCo(90 nm)/sub. (c)CoNi(90 nm)/sub.

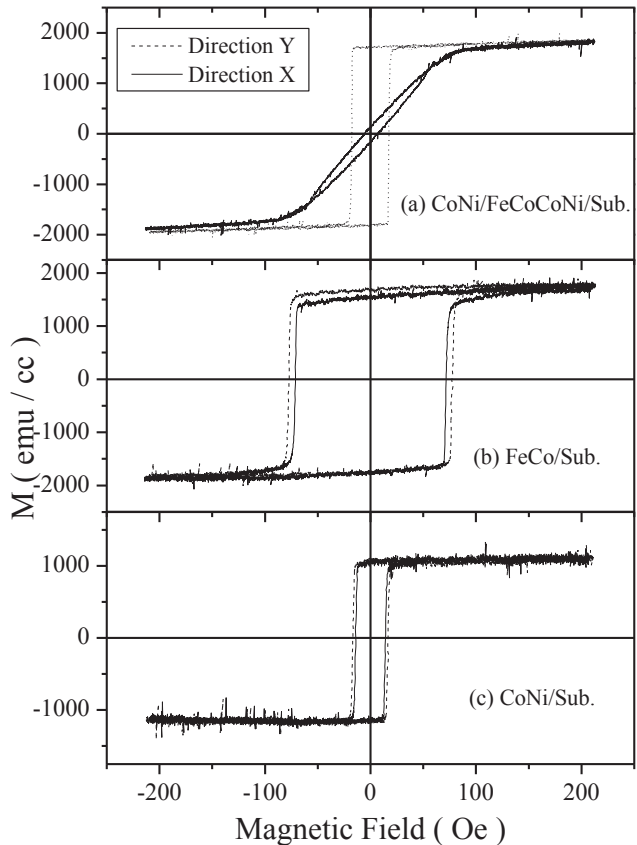
薄膜の磁気特性は振動試料型磁力計 (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) を用いて評価した。薄膜の結晶学的性質は、X線回折装置 (X-Ray Diffraction, XRD) を用いて測定した。作製した磁性細線は Fig. 1 の Y 方向に交流消磁を行った後、カー顕微鏡を用いて、磁区構造を観察した。更に粉末図形法を用いて、磁壁の分布を観察した。

実験結果を検討するために、マイクロマグネティックシミュレーションを行った。OOMMF のパッケージ<sup>10)</sup>を使用した。面内幅方向に導入する一軸異方性の大きさを異方性定数  $K_u$  によって変化させ、面内幅方向の一軸異方性と磁区構造の関係を調査し、本実験で作製した磁性細線と比較した。

### 3. 結果と考察

Fig. 2 に 3 つの異なる条件で成膜した薄膜の XRD 解析の結果を示す。(a) 下地層に CoNi 3 nm、キャップ層に CoNi 2 nm をスパッタした膜厚 30 nm の FeCo 三層膜、(b) FeCo 膜厚 90 nm の単層膜、(c) CoNi 膜厚 90 nm の単層膜の XRD ダイアグラムである。(a) FeCo 三層膜では、最強の回折線が体心立方構造 bcc の(110)面からのピークと観察された。(a) FeCo 三層膜の最強の回折線は(c) CoNi 単層膜の最強の回折線と近い角度で観測された。しかし、三層膜の CoNi 下地層は膜厚 3 nm であり、膜厚 90 nm の CoNi 単層膜に比べ強い回折線が観測されることは考えづらい。よって、本三層膜への XRD 解析によって得られた結果は FeCo 層からの回折線であると考えられる。(b) では最強の回折線が FeCo 単層膜の bcc(200)面のピークと観察された。(c) CoNi 単層膜では面心立方構造 fcc の(111)面のピークと観察された。

Fig. 3 に 3 つの異なる条件で成膜した薄膜の面内方向のヒステリシスループを示す。破線は Y 方向の、そして実線は X 方向の磁化曲線である。同図から分かるように、FeCo 単層膜は等方的で、異方性磁界を明確に評価できない。しかし、同図(a)に示すように三

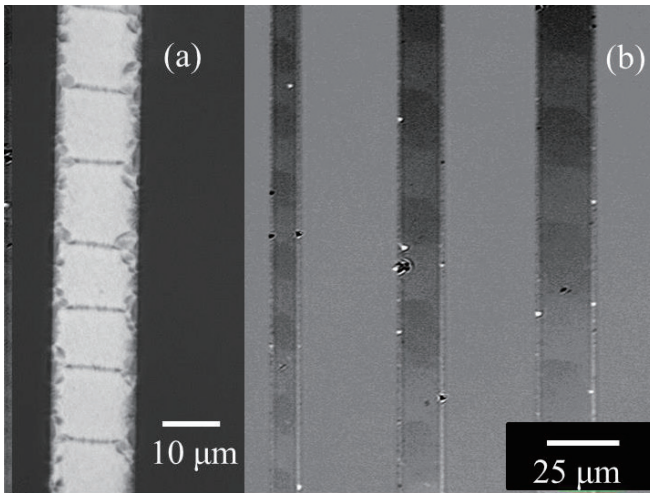


**Fig. 3** M-H loops, (a) CoNi(2 nm)/FeCo(30 nm)/CoNi(3 nm), (b) FeCo(30 nm), (c) CoNi(30 nm).

層膜では明確に磁化困難軸及び容易軸が認められた。このことより、本実験における成膜法により、FeCo 磁性膜に面内方向の一軸異方性を導入できることが確認できる。面内方向の異方性磁界は約 90 Oe である。

また、Fig. 3 から FeCo 層の下地層に CoNi 層を導入することにより、FeCo 層の保磁力を低減できることが明らかになった。三層膜の保磁力は約 20 Oe である。また、CoNi の単層膜の保磁力も約 20 Oe であり、三層膜と CoNi 単層膜の保磁力は非常に近い値である。これは、CoNi 層の上に成長した FeCo 層の粒子サイズが下地層の影響により小さくなり<sup>9)</sup>、ナノ結晶粒子間に働く交換相互作用のため、保磁力が低減されたもの<sup>11)</sup>と考えられる。

Fig. 4 (a) は、本実験において作製した磁性細線の磁壁を、粉末図形法を用いて観察した写真である。この磁性細線と同じ膜構造の薄膜における異方性磁界は約 94 Oe であった。同図から磁性細線の幅方向に 180 度磁壁が確認できる。また、Figure 4(b)は(a)と同じ試料の磁性細線のカー顕微鏡写真である。カー顕微鏡の写真のコントラストの明るい部分では、写真の左から右へ N 極から S 極に細線の幅方向に、磁化が向いている。同図(a),(b)より本実験における磁性細線の作製法により、面内幅方向の磁区の導入が可能であるということが確認された。また、磁性細線の幅が 10  $\mu\text{m}$  以下の細線でも 180 度磁壁が観察される点から、細線長手方向に付与



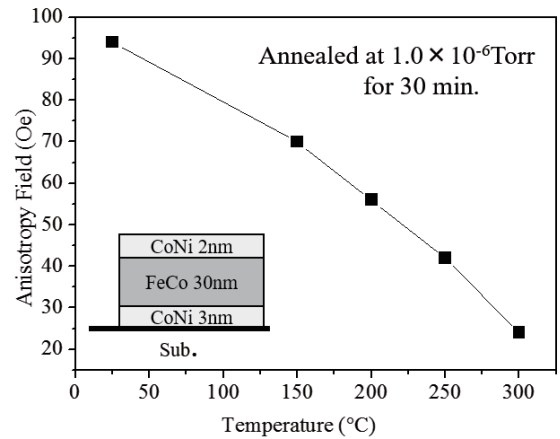
**Fig. 4** Pictures of magnetic domain configuration. (a) Bitter pattern. (b) Kerr microscope image.

されている形状磁気異方性に対して、非常に大きい面内幅方向の一軸異方性が付与されていることが考えられる。また、同図(b)のカー顕微鏡のコントラストから、幅の細い細線においては幅の太い細線よりも磁区のサイズが小さくなっているのが確認される。これは面内長さ方向の一軸異方性の影響が強く、エネルギー的に安定な構造をとったため、磁区が細かく分割された結果であると考えられる。

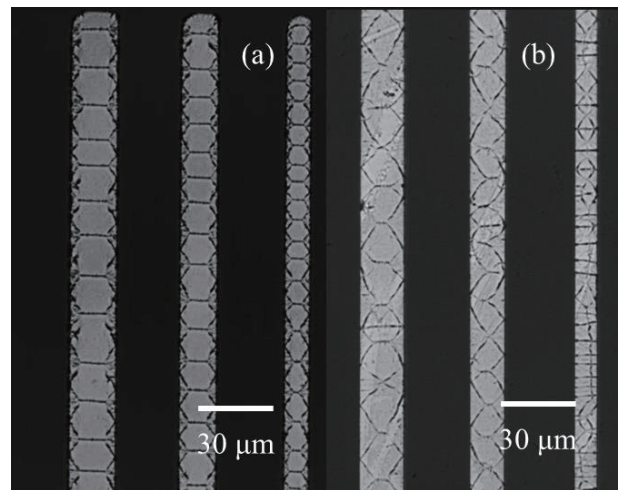
Fig. 5は、本実験と同じ膜構造の薄膜を  $1.0 \times 10^{-6}$  Torr 以下の真空中で熱処理を行った際の面内異方性境界のアニール温度依存性を示したグラフである。この図から as prepared では面内磁気異方性は約 94 Oe であるのに対して、熱処理を加えると面内異方性境界は 150–300 °C でほぼ直線的に低減されていることが確認される。

Fig. 6は、Fig. 4の磁性細線と同じ膜構造の細線を (a) 200 °C (b) 300 °C の真空中で、それぞれ 30 分間熱処理を加えた結果を示している。(a)より熱処理により面内幅方向の一軸異方性が低減され、細線幅が狭くなるにつれて 180 度磁壁が短くなり、90 度磁壁に変化していることが確認される。また、(b)の細線幅が最も太い細線でも大部分の磁壁が 90 度磁壁となっている。これは細線内の磁区構造が、エネルギー的に安定した状態をとるために還流磁区に構造変化したためである。Fig. 4 (a), Fig. 6(a), (b) から観察される磁区構造の変化は、Fig. 5 で示した面内幅方向の一軸異方性のアニール温度依存性によるものと考えられる。

Fig. 7は磁性細線に幅方向に付与される一軸異方性が変化した場合に生じる磁区構造をシミュレートしたものである。シミュレーションは 3 次元で行ったが、ここでは本実験で得られる細線表面の磁区構造との比較のため、図では平面構造を示している。これから、面内方向一軸異方性の増大に伴い、磁性細線の長手方向に揃っていた磁化の向きが細線幅方向に変化する様子が確認される。Fig. 7 (a) - (c) に示すように一軸異方性が大きくなるにつれ、Fig. 6の実験結果のように、環状磁区から 180 度磁壁が主体の構造にな



**Fig. 5** Dependence of anisotropy field of CoNi/FeCo/CoNi thin film on the annealing temperature.



**Fig. 6** Bitter patterns on magnetic wire of CoNi/FeCo/CoNi. (a): annealed at 200 °C. (b): annealed at 300 °C.

ることが明らかになった。また、Fig. 7(d)の幅方向の一軸異方向が細線長手方向の異方性よりも十分に大きくなった場合は、Fig. 6(a)に見られる 180 度磁壁が確認される。また、Fig. 7(d)で見られる磁区の方法は Fig. 6 (b)の細線でも確認することができる。以上より、本シミュレーションで得られた結果から、本実験による磁性細線の磁壁の変化は、細線幅方向の一軸異方性が大きいに関係しているということが考察できる。

#### 4. まとめ

本論文では、FTS を用いて CoNi/FeCo/CoNi の三層膜とすることで、微細な FeCo 磁性細線の幅方向の磁気異方性を導入できることを明らかにした。また、FeCo 層の下地層として CoNi 層を導入することにより、保磁力を大きく低減させた。作製した磁性細

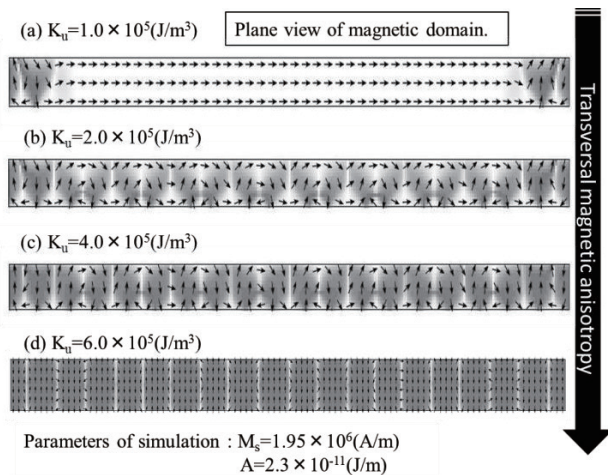


Fig. 7 Plane view of domain structure of magnetic wire.

線に熱処理を加えて異方性磁界を低減させ、その磁壁の変化とマイクロマグネティクス・シミュレーションの結果の一致から、本実験で付与した面内一軸異方性と磁区構造との関係を明らかにした。面内一軸異方性が小さい時、大部分の磁性細線上の磁化の向きは細線長手方向に揃っている。しかし、幅方向の一軸異方性が大きくなると還流磁区が観察され、180度磁壁が主体の構造になることが明らかになった。なお、磁気異方性の原因は、FTSにおける斜め入射効果、漏れ磁界による異方性そして応力による異方性が考えられる。これに関しては、今後詳細に検討する予定である。

**謝辞** 本研究は、独立行政法人日本学術振興会とシンガポール NUS との二国間交流事業共同研究による支援を得た。

## References

- 1) S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas: *Science*, **320**, 190 (2008).
- 2) D. A. Allwood, G. Xiong, C. C. Faulkner, D. Atkinson, D. Petit, and R. P. Cowburn: *Science*, **309**, 1688 (2005).
- 3) A. Yamaguchi, T. Ono, S. Nasu, K. Miyake, K. Mibu, and T. Shinjo: *Phys. Rev. Lett.* Vol. **92**, No.7 (2004).
- 4) L. Berger: *J. Appl. Phys.*, Vol. **71**, No.6, pp. 2721-2726 (1992).
- 5) M. Yamaguchi, S. Koya, H. Torizuka, and S. Aoyama: *IEEE Trans. Magn.*, **43**, p. 2370 (2007).
- 6) L. G. Vivas, M. Vazquez, J. Escrig, S. Allende, D. Altbir, D. C. Leitao, and J. P. Araujo: *Phys. Rev.* **B85**, 035439 (2012).
- 7) M. Matsumoto, A. Ito, and A. Morisako: *Jikikirokukougaku*, p. 114 (Kyoritsu Shuppan, Tokyo, 1990).
- 8) T. Miyao, X. Liu, and A. Morisako: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**(3), 341-344 (2006).
- 9) Y. Fu, T. Miyao, J. W. Cao, Z. Yang, M. Matsumoto, X. Liu, and A. Morisako: *J. Mag. Mag. Mat.*, **308**(1), 165-169 (2007).
- 10) Donahue, Michael Joseph, and Donald Gene Porter. "OOMMF: Object Oriented Micro Magnetic Framework." (2016). The code is available at "http://math.nist.gov/oommf".
- 11) G. Herzer: *J. Mag. Mag. Mat.*, **112**, 258-262 (1992).

2016年10月3日受理, 2016年11月28日再受理, 2017年3月6日採録