

Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の特徴と磁気デバイスへの応用

Characteristics of Nd-Fe-B/Ta Multilayered Permanent Magnet Thin-films and Their Application to Magnetic Devices

上原 稔*
Minoru Uehara

進士 忠彦**
Tadahiko Shinshi

本論文では、Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の特徴を実用化の観点から議論し、その磁気マイクロデバイスへの応用について報告する。Ta と特定の多層構造を持った Nd-Fe-B 基薄膜において、垂直磁気異方性を有する均一サイズの微細 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 粒子からなる組織が形成されたことにより、磁石特性と耐熱特性が向上した。この薄膜を用いて 2 種類のデバイスを製作したところ、工業的応用に有意な特徴が発現した。広いギャップと自己保持機構を備えたスイッチデバイスは RF-スイッチへの応用が期待され、リニアモータにおいては、永久磁石膜利用による顕著な小型化と 2 G を超える加速性が実証された。

This article discusses the characteristics of Nd-Fe-B/Ta multilayered permanent magnet thin-films, and reports their application to magnetic micro devices. The Nd-Fe-B-based films having specific multilayered configurations with Ta have demonstrated improved magnetic properties and thermal stability owing to the microstructure composed of uniformly-sized fine $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ grains with perpendicular magnetic anisotropy. Two devices equipped with these thin-films have been fabricated and show interesting features in industrial applications. The switch device with a large gap and mechanical latch system is expected to work as an RF-switch. In the linear motor, noticeable miniaturization due to the use of the thin-film magnets, along with acceleration above 2 G has been verified.

● Key Word : Nd-Fe-B, 薄膜, マイクロデバイス

● R&D Stage : Development

1. 緒言

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 基の焼結磁石¹⁾ とボンド磁石²⁾ は、その高い磁気エネルギー積によって、これまでに永久磁石を利用する機器やデバイスの小型化を牽引してきた。現在もなお、携帯端末をはじめとする電子機器の小型・高機能化のトレンドは留まることを知らず、こうした機器に使用されるサブミリサイズの $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 基焼結磁石の需要が増加している。

こうした小型永久磁石を使用するデバイスの中には、このところ急速に普及が進んでいる MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems) 技術の一部に適用し、製造されているものが存在する。しかし、MEMS技術はウェハー単位のバッチプロセスが基本であるため、バルク永久磁石のアセンブリ工程とは相容れ難い。したがって将来的に目指すべきは、MEMS技術と整合性のとれた薄膜の永久磁石材料

を開発し、MEMS技術の特長を生かした磁気マイクロデバイスを実現していくことだと考えられる。

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 基の永久磁石の中で、薄膜は永らく潜在的なポテンシャルを発揮できずにいたが、先に筆者らは、Nd-Fe-B層とTa層を交互にスパッタリング形成した多層構造の永久磁石薄膜を提案し、焼結磁石に匹敵する磁気エネルギー積を有する薄膜を開発した^{3), 4)}。その後、実用化を念頭においた材料開発と並行して、2008年以降、永久磁石薄膜の応用を掘り起こすため、Nd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を用いたMEMS磁気デバイスの試作開発にも取り組んでいる^{5)~7)}。

本論文では、材料としてのNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜の特徴を実用化の視点から議論し、その後この薄膜を応用したスイッチデバイスとリニアモータの試作結果を報告する。

* 日立金属株式会社 NEOMAX カンパニー

** 東京工業大学 精密工学研究所

* NEOMAX Company, Hitachi Metals, Ltd.

** Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

2. Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の特徴

2.1 永久磁石特性

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 基の永久磁石薄膜は、粉末冶金法における粉砕粒度や磁界中成型、溶湯急冷法での結晶化熱処理や塑性加工といった、結晶粒子径や磁化容易軸方向を制御する技術が見出せず、永らく期待される磁気特性が発揮できなかった。日立金属は、多層膜構造による組織制御を試み、マグネトロンスパッタ法により、加熱した基板にNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を形成する技術を開発した。この技術によって、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の磁化容易方向であるc軸が膜面垂直方向に揃った異方性の永久磁石薄膜が得られる。図1に[Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×10からなる多層膜構造を有した永久磁石薄膜の磁化曲線を示す。ここでは反磁界補正を行っていないが、強い反磁界を受ける膜面垂直方向であっても、角型性の良好な減磁曲線が得られている。この減磁曲線から導出されたNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜の永久磁石特性値は、表1で比較されているように、異方性焼結磁石のそれに匹敵するものであった。

Nd-Fe-B/Ta多層構造の最大の特徴は、周期的に挿入されるTa層が $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の結晶成長を遮断するため、多層膜

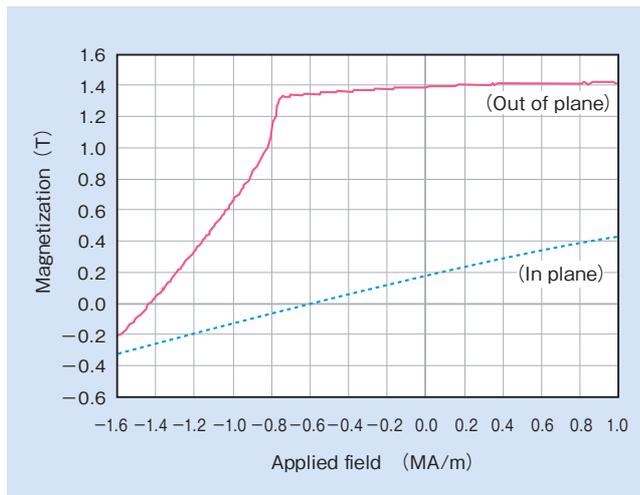


図1 [Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×10 多層永久磁石薄膜の減磁曲線

Fig. 1 Demagnetizing curves of [Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×10 multilayered permanent magnet thin-film

表1 [Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×10 多層永久磁石薄膜の永久磁石特性

Table 1 Permanent magnet properties of [Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×10 multilayered permanent magnet thin-film

	Energy product (BH) _{max}	Remanent magnetization J_r	Intrinsic coercivity H_{cJ}
	kJ/m ³ (MGOe)	T (kG)	kA/m (kOe)
Thin-film [Nd-Fe-B/Ta] (Thickness: 5.8 μm)	364 (45.7)	1.39 (13.9)	1430 (18.0)
Sintered Nd-Fe-B (NEOMAX-48BH)	358~390 (45~49)	1.36~1.42 (13.6~1.42)	1114 (14.0)

構造を持たない磁石に対して薄膜の金属組織を微細均一に、高精度で制御できる点にある。これが可能になったことで、TbやDyといった重希土類金属を添加せずとも、それらを使用する焼結磁石に匹敵する高保磁力が発現した。図2に200 nmのNd-Fe-B層と10 nmのTa層を、全膜厚がそれぞれ約1 μm (図2 (a)), および約10 μm (図2 (b))まで多層化した薄膜の破断面を、高分解能走査電子顕微鏡で観察した写真を示す。図2 (a)は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の最大粒子径がNd-Fe-B層の膜厚で厳格に制限されていることを示す。また、図2 (b)では、膜厚10 μmというスパッタ法では厚膜であっても、制御された均一微細組織が膜全体を支配していることが確認できる。詳細な検討では、Nd-Fe-B層の膜厚が約500 nm以下になると保磁力と角形性の顕著な向上が見られた。この事実から、現実の磁区状態は粒子間の磁気相互作用が考慮されなければならないものの、保磁力向上効果を促す結晶粒子径として、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の理論上の臨界単磁区粒子径である300 nmが目安として考えられる⁸⁾。

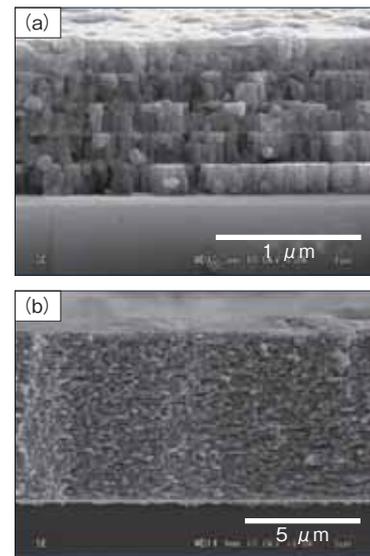


図2 Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の破断面の走査電子顕微鏡写真 (膜厚: (a) 約1 μm, (b) 約10 μm)

Fig. 2 Scanning electron micrographs of fractured cross-sections of Nd-Fe-B/Ta multilayered permanent magnet thin-films with thickness of (a) about 1 μm, and (b) about 10 μm

多層構造のもう一つの特徴に、Ta層の上にNd-Fe-B層を形成することで、堆積と同時に結晶化した $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の磁化容易軸(c軸)の垂直配向度がより向上することを挙げることができる。図3で、[Nd-Fe-B (200 nm) /Ta (10 nm)] ×5のX線回折パターンをNd-Fe-B異方性焼結磁石のものと比較した。散乱ベクトルの方向は、多層膜が面垂直方向、焼結磁石が成形時の配向磁場方向である。例えば(105)のように、(001)からずれた指数からの回折ピークの相対強度は、焼結磁石よりも多層膜の方が弱く、多層膜のc軸がより強く配向していることが示されている。この強いc軸配向が残留磁化を従来の薄膜では得られなかった水準にまで高め、磁気エネルギー積の向上に導いた。

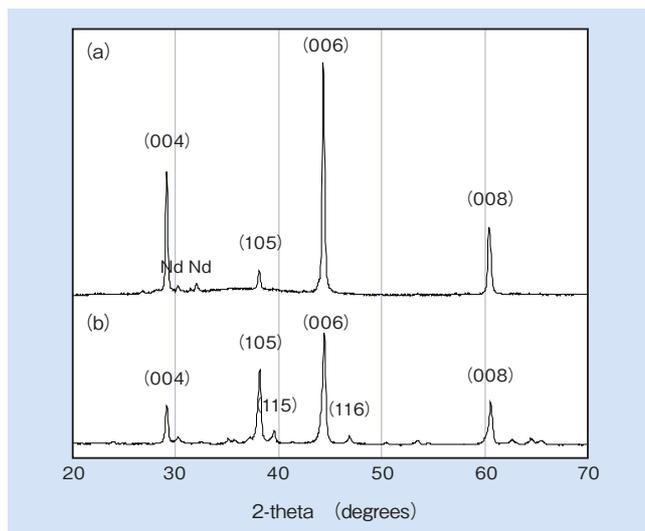


図3 X線回折パターン (a) Nd-Fe-B/Ta 多層膜, (b) Nd-Fe-B 異方性焼結磁石

Fig. 3 X-Ray diffraction patterns (a) Nd-Fe-B/Ta multilayered thin film, (b) Nd-Fe-B anisotropic sintered magnet

2.2 耐熱特性⁹⁾

キュリー点が比較的低いNd₂Fe₁₄Bが磁性を担う永久磁石薄膜において、同じ主相を持った焼結磁石やボンド磁石と同様に、耐熱性の克服が実用化に向けての重要な課題である。特に垂直磁化膜の場合は、膜が常に強い反磁界にさらされるため、熱減磁に対する懸念がさらに大きい。そこで、Nd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜の耐熱性を評価するため、一層のNd-Fe-B膜厚が200または500 nmで、総膜厚が1, 2, 5 μmなる6種類と、比較として膜厚1 μmのNd-Fe-B単層薄膜の不可逆熱減磁率を測定した。ここで、不可逆熱減磁は、室温で着磁した後に計測した磁化と、同じ試料を所定の温度まで加熱して1時間保持し、再び室温に戻した後に計測した磁化の差で定義される。結果を図4に示す。これによると、Nd₂Fe₁₄B基の薄膜は、Taと多層膜化することにより熱減磁が低下し、さらにNd-Fe-B層の膜厚が500

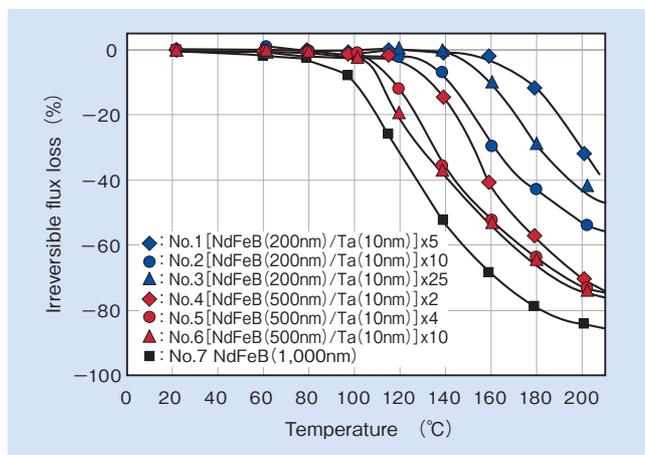


図4 Nd-Fe-B/Ta 多層永久磁石薄膜の不可逆熱減磁率

Fig. 4 Irreversible thermal flux loss of Nd-Fe-B/Ta multilayered permanent magnet thin-films

nmから200 nmへと薄くなることで耐熱性が向上している。永久磁石の耐熱性を定量化するため、不可逆熱減磁率が-5%に達する温度を耐熱温度と定義すると、Nd-Fe-B層の膜厚が200 nmの多層膜の耐熱温度は130℃以上となり、その中に150℃を超える薄膜も存在している。

Nd-Fe-B/Ta多層膜の耐熱温度には、焼結磁石やボンド磁石と同様に室温での保磁力に対する依存性が認められた。さらに詳細な関係を見るため、多層膜の室温での磁化曲線を解析したところ、減磁曲線上に不可逆磁化反転に起因する屈曲が現れる磁界が、耐熱温度に対してより緊密に関係していることが明らかとなった。図5は、[NdFeB(200 nm)/Ta(10 nm)] × 25の磁化曲線を解析した例で、ここで屈曲点に対応した屈曲磁界 (H_{kp}) を次式で表される微分磁化率 (χ_{diff}) が立ち上がる磁界として定義した。

$$\chi_{diff} = \mu_0^{-1} \cdot (dJ/dH) \quad (1)$$

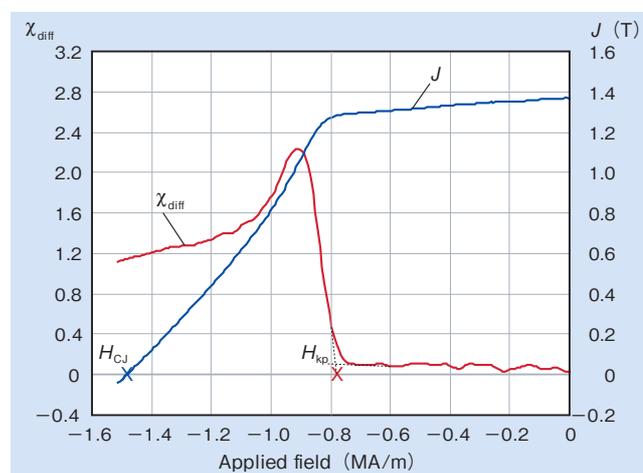


図5 [NdFeB(200 nm)/Ta(10 nm)] × 25の減磁曲線 (J), 微分磁化率曲線 (χ_{diff}) と、保磁力 (H_{cJ}), 屈曲磁界 (H_{kp}) の定義

Fig. 5 Demagnetizing (J) and differential susceptibility (χ_{diff}) curves of [NdFeB(200 nm)/Ta(10 nm)] × 25, defining coercivity (H_{cJ}) and knickpoint field (H_{kp}), respectively

図6は、多層膜の屈曲磁界と保磁力を耐熱温度に対してプロットしたもので、これから耐熱温度と屈曲磁界との間に一次相関が成り立っていることがわかる。したがって不可逆熱減磁は、温度上昇に伴う減磁曲線のシフトによって動作点が屈曲点を超えることで発生し、多層膜における耐熱温度の上昇は、結晶粒子径の均一微細化により屈曲磁界が向上したことが要因と考察できる。また屈曲磁界と耐熱温度が強い一次相関を有する実験事実は、温度変化の幅に対する減磁曲線のシフトの度合いが、結晶粒径に依存せずほぼ一定であることを意味している。

150℃を超える耐熱温度は、自動車関連など一部を除くと、永久磁石を使った現行の応用機器の広い範囲をカバーする。したがって、Nd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を応用することで、小型・高性能に留まらず、信頼性の高い磁気マイクロデバイスを得られることが期待される。

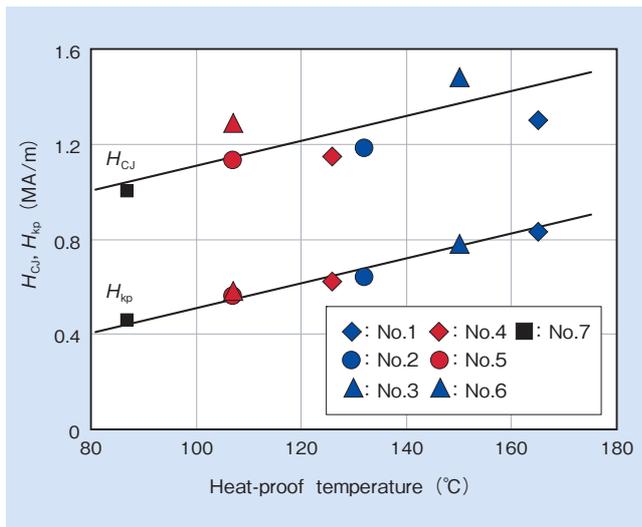


図6 耐熱温度 (H_{kp}) と保磁力 (H_{cj}), または屈曲磁界 (H_{kp}) との相関

Fig. 6 Correlation between heat-proof-temperature (H_{kp}) and coercivity (H_{cj}), or Knickpoint field (H_{kp})

2.3 微細加工性

永久磁石薄膜を小型・高性能のマイクロデバイスに応用するためには、薄膜の高精度微細加工技術の確立が不可欠である。微細加工の方法は、一枚の基板上に多数の素子をバッチプロセスにより同時に作製することを可能にするMEMS技術の適用が望ましい。MEMS技術による微細加工法には、有機レジスト材などで微細パターンを形成し、それを犠牲層として用いるリフトオフ法や、形成した微細パターンをマスクとして用いるエッチング法等が知られている。筆者らは、Nd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜が化学的に活性であることに考慮し、この薄膜の微細加工方法として、アルゴンイオンミリングの適用を検討した。

図7は膜厚1 μm の単層のNd-Fe-B膜を、アルゴンイオ

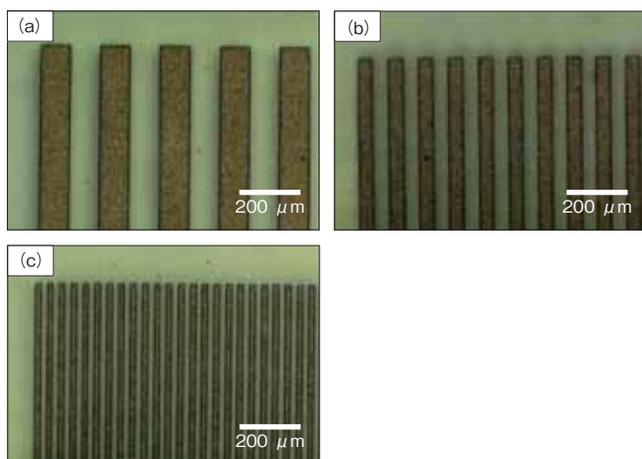


図7 アルゴンイオンミリングによりライン&スペース (L/S) 加工したNd-Fe-B薄膜の光学顕微鏡写真; L/S = (a) 100/100 μm , (b) 50/50 μm , (c) 20/20 μm

Fig. 7 Microphotographs of line-and-space patterns of Nd-Fe-B thin films fabricated by argon-ion milling; L/S = (a) 100/100 μm , (b) 50/50 μm , (c) 20/20 μm

ンミリングによって、それぞれ100/100, 50/50, 20/20 μm のライン&スペース (L/S) パターンに加工を施したものである。エッジ部も明瞭に加工されており、ライン幅20 μm の狙い寸法に対しては、 $-2 \mu\text{m}$ 以下の加工精度が得られた。また、イオンミリング速度は約37 nm/minで、一般的な金属材料と遜色のない加工能率が確認された。

図8は、イオンミリングによって加工された後の、これらの試料の磁化曲線を、加工前の膜と比較して示したものである。L/S幅が狭くなるに伴って残留磁化の低下が見られるが、先の考察のように、加工後のライン幅が、狙い寸法に対して少し狭くなったことが影響したとみられる。アルゴンイオンミリングによるNd₂Fe₁₄B基の薄膜の加工で、事前に最も懸念されていたのは、イオンの衝撃によって膜の表面に歪や欠陥が生じ、それらが保磁力を低下させることであった。しかし図8によれば、L/S幅が狭まって加工面の面積が増しても保磁力に悪影響が及ばず、逆に保磁力が若干向上する結果となった。

Nd₂Fe₁₄B基の薄膜に対し、微細加工方法としてのアルゴンイオンミリングの基本的適合性を明らかにした本検討の結果を受け、後述するNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を備えたりニアモータの製作工程にこの技術を適用した。ここでは、膜厚約6 μm のNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜に対し、生産適用可能な加工能率で、ミクロンレベルの加工精度が得られることが確認された。

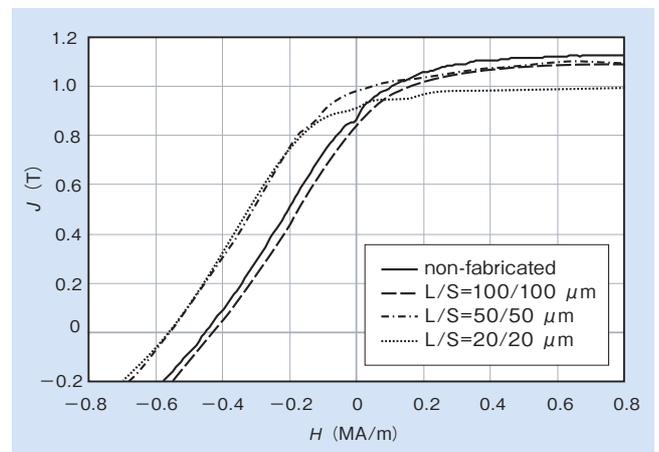


図8 アルゴンイオンミリングによるライン&スペース加工前後のNd-Fe-B薄膜の減磁曲線

Fig. 8 Demagnetizing curves of Nd-Fe-B thin films before and after fabrication into line-and-space patterns by argon-ion milling

3. 磁気デバイスへの応用

3.1 MEMSスイッチ⁷⁾

高周波化が進む携帯電話など無線通信分野のスイッチデバイスは、従来の半導体スイッチに替わるものとして、低損失で高いアイソレーション特性が得やすい機械式スイッチの検討が進められており、接点の駆動方法が、静電方式や永久磁石を用いた電磁方式のMEMSスイッチがこれまでに商品化されている。原理や構造が比較的簡単な静電方式

に対して永久磁石を使った電磁方式のスイッチは、永久磁石と磁性体の静磁気力を利用して、電力を使わずに接点状態を保持できるという特徴を有している。

筆者らはかつて、Nd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を用いた片持ち梁アクチュエータを開発し、静電駆動等では困難な大振幅の変位を得ている^{5), 6)}。ここでは、その片持ち梁アクチュエータを利用し、自己保持機構あるいはメカニカルラッチングと呼ばれる、電力を消費せず接点状態を保持することが可能なスイッチデバイスの製作を試みた。

図9に、作製したスイッチデバイスの写真を示す。可動部は、厚み3 μm のSiN製で、 0.4×2.0 mmの片持ち梁とその自由端側に形成した 2×2 mmのパドル部で構成される。この構造は両面にSiN膜を形成した単結晶シリコン基板にMEMS技術を適用して製作され、片持ち梁が完成した後、パドル部に厚み3 μm のNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜がハードマスクを用いたスパッタ法によって形成されている。固定接点側には、可動部とは別の基板に、線径0.25 mmのCu線を接着することで励磁コイルが形成されている。さらに固定接点側には、永久磁石膜に対して自己保持に必要な吸引力を発生させるための厚さ5 μm 、 2×2 mmのNi箔が配置されている。可動接点と固定接点がそれぞれ作り込まれた2つの基板は、接点間のギャップが計算で得た設計値となるよう、スペーサを挟んで接合されている。

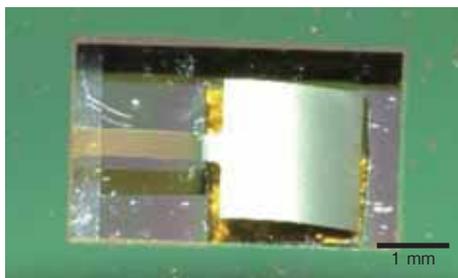


図9 試作したマイクロスイッチ
Fig. 9 Fabricated micro-switch

図10にコイルに流した励磁電流と、それに伴った可動接点の動きを変位センサで計測した結果を示す。これを見る

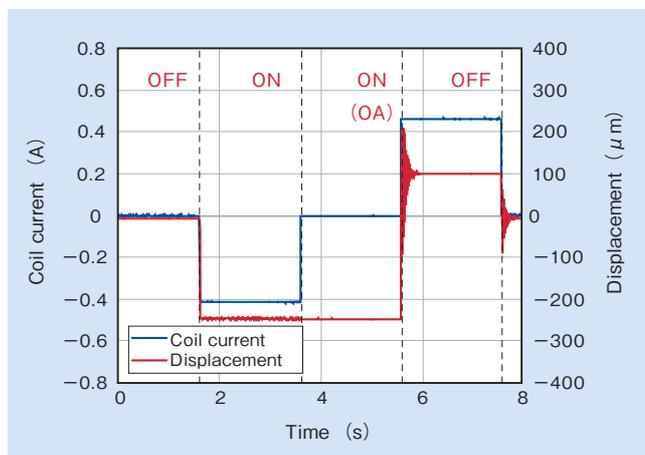


図10 コイル電流と可動接点の変位の関係
Fig. 10 Relationship between coil current and displacement of the moving contact

と、0.4 Aのコイル電流で閉じた接点は、通電を止めても閉状態を保ち、逆電流の通電によって接点が開く。その後通電を止めた状態でも、200 μm を超える接点間のギャップが確保されている。

こうした、自己保持機構と広いギャップを有するスイッチは、永久磁石を用いた電磁駆動式スイッチ固有の特徴であり、省消費電力でアイソレーションの高い、高周波帯域のRF-スイッチへの応用が期待できる。現在、そうした用途を念頭に置いた開発・評価を進めている。

3.2 リニアモータ

永久磁石式のリニアモータは、通常多数個の永久磁石を用いるため、小型化が困難な磁気デバイスの一つと考えられている。そこで著者らは、ドライエッチングによって微細加工したNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜の磁気回路を備えた、マイクロリニアモータの製作を試みた。

完成したリニアモータの写真を図11に示す。今回試作したリニアモータは、可動部に配線が不要な、スライダに永久磁石を備えたムービングマグネットタイプとした。それは、スライダ、ガイド、Cu製平面コイルを形成した固定子から構成される(図11 (a))。本試作の目的が、永久磁石薄膜を用いたマイクロリニアモータの動作検証であることから、コイルは、構造が単純なミアンダ型空芯コイルとした。その製作は、石英ガラス上にスパッタ形成したCu膜を、レーザー加工機でパターンニングすることにより行った。Cu製コイルは膜厚3 μm 、線幅160 μm 、ライン間のピッチを400 μm とした。同様の理由から、ガイドも簡便に高精度が得られるAl合金の機械加工によって製作した。スライダは、最終寸法が $4 \times 4 \times 0.26$ mmの単結晶シリコン製で、コイル対向面には、マグネトロンスパッタで形成した膜厚6 μm のNd-Fe-B/Ta永久磁石多層薄膜を、ライン&スペース間隔が0.4 mmになるようにアルゴンイオンミリングで加

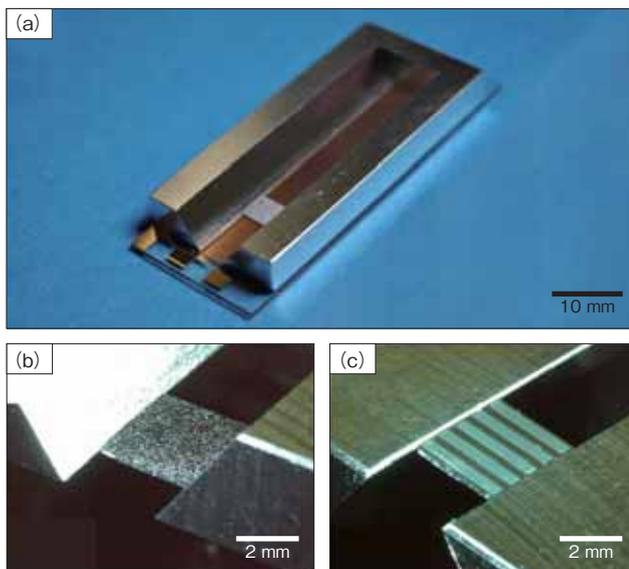


図11 完成したリニアモータ (a) 全体、(b) スライダ表面、(c) スライダ裏面
Fig. 11 Photographs of the fabricated linear-motor (a) over-all view, (b) front-side and (c) reverse-side views of the slider

工し、配置した (図11 (c))。摺動面はスライダの側面に設けられており、ここにガイドにはめ込むためのV字溝を、単結晶シリコンのKOHによる異方性エッチングを利用して形成した。

図12に製作したリニアモータにおいて、コイル電流を約1.5 A流した際のスライダの変位の計測結果と、その変位を時間微分して導出した速度を示す。ガイドの始端から終端に至るストローク30 mm以上の駆動が確認され、最大速度1 m/s以上、加速度26.0 m/s²が得られた。また、別途、駆動に必要な最小のコイル電流を調査したところ、およそ0.5 Aの値が得られ、その際の加速度は5.7 m/s²であった。これらの結果から、製作したリニアモータの諸元として、電流1 A当たりの推力が約200 μ N、スライダの静止摩擦係数が1.0、動摩擦係数が0.5という値が導かれた。

今回、動作検証を目的としたNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜を用いたリニアモータの試作で、2 Gを超える加速性が実証された。今後は、さらに位置検出機構の組込、摺動摩擦の低減、小型化などの課題に取り組み、デバイスの完成度を高めていく予定である。

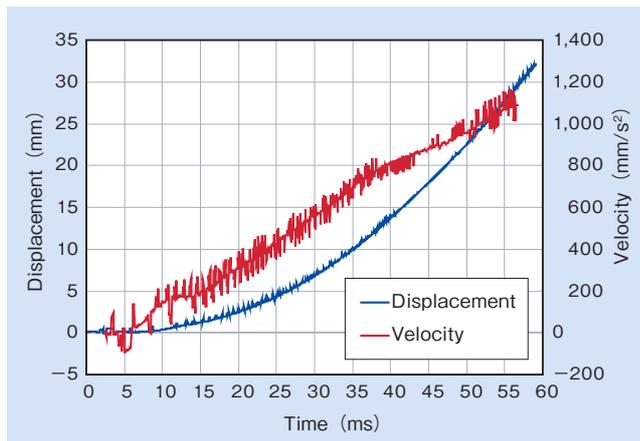


図 12 スライダの変位と速度
Fig. 12 Displacement and velocity of the slider

4. 結 言

本論文では、日立金属が開発したNd-Fe-B/Ta多層永久磁石薄膜の高い永久磁石特性と耐熱特性の起源を、この薄膜材料固有の微細組織との関連で議論し、多層膜構造化に伴うNd₂Fe₁₄B結晶の微細均一化に発することを明らかにした。また、薄膜の実用化に必要な微細加工方法としてアルゴンイオンミリング法を検討し、デバイス試作への適用例を報告した。さらに、上記永久磁石薄膜を応用した2種類のデバイスを製作し、広いギャップと自己保持機能を備えたMEMSスイッチには、RF-スイッチへの応用が期待され、リニアモータにおいては高加速性が実証された。今後も、実用化を念頭に置いた永久磁石薄膜材料の研究開発を進めるとともに、それを利用した磁気デバイスの提案を行っていく所存である。

5. 謝 辞

東京工業大学大学院生の田辺亮氏、同じく石橋正登氏には、デバイスの製作と評価についてご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

なお、本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構のシーズイノベーション化事業顕在化ステージ、および研究成果最適展開事業A-STEPの支援を受けて行われた。

引用文献

- 1) M. Sagawa, S. Fujimura, M. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura: J. Appl. Phys., 55 (1984) 2083.
- 2) J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee and F. E. Pinkerton: J. Appl. Phys., 55 (1984) 2079.
- 3) M. Uehara: J. Magn. Soc. Jpn., 28 (2004) 1043. (in Japanese)
- 4) M. Uehara, N. Gennai, M. Fujiwara, and T. Tanaka: IEEE Trans. Magn., 41 (2005) 3838.
- 5) 後藤駿治, Sen Yao, 進士忠彦, 櫻井淳平, 上原稔, 山本日登志: 第17回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 日本AEM学会 (2008), p.75.
- 6) S. Yao, S. Goto, J. Sakurai, T. Shinshi, M. Uehara and H. Yamamoto: Proc. IEEE-NEMS (2009), p.411.
- 7) 石橋正登, 田辺亮, 進士忠彦, 上原稔: 第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 日本機械学会 (2010), p.704.
- 8) J. D. Livingston: J. Appl. Phys., 57 (1985) 4137.
- 9) M. Uehara, and H. Yamamoto: J. Magn. Soc. Jpn., 33 (2009) 227. (in Japanese)



上原 稔
Minoru Uehara
日立金属株式会社
NEOMAX カンパニー
磁性材料研究所



進士 忠彦
Tadahiko Shinshi
東京工業大学
精密工学研究所 教授
博士 (工学)