

微細加工された強磁性細線の偏光顕微鏡による観察

Kerr Microscope Observation of Microfabricated NiFe Wires

横山侑子・重藤訓志*・P. GOGOL**・J. MILTAT**・A. THIAVILLE**・
川越毅***・鈴木義茂・小野輝男****・新庄輝也*・湯浅新治・安藤功兒

電子技術総合研究所, つくば市梅園 (〒305-8568)

*京都大学化学研究所, 宇治市五ヶ庄 (〒611-0011)

**CNRS-パリ南大, オルセー市 (〒91405)

***JRCAT-ATP, つくば市東 (〒305-8562)

****慶應義塾大学理工学部, 横浜市港区日吉 (〒223-8522)

Y. Yokoyama, K. Shigeto*, P. Gogol**, J. Miltat**, A. Thiaville**, T. Kawagoe***,

Y. Suzuki, T. Ono****, T. Shinjo*, S. Yuasa, and K. Ando

Electrotechnical Laboratory, Umezono, Tsukuba 305-8568

*Institute for Chemical Research, Kyoto Univ., Gokasho, Uji 611-0011

**Laboratoire de Physique des Solides, CNRS, Univ. Paris Sud, Orsay 91405

***JRCAT-ATP, Higashi, Tsukuba 305-8562

****Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Hiyoshi, Kohoku, Yokohama 223-8522

(1999年10月28日受理, 2000年1月25日採録)

Magnetization processes in microfabricated NiFe wires were observed by using a Kerr microscope equipped with an oil-immersion lens ($NA = 1.3$) and an Hg lamp. NiFe wires 20 nm in thickness were prepared by using lift-off techniques. The width (W) of the wires was designed as 0.5, 1.0 and 2.0 μm and the length (L) as 50 μm . One end of the wire was connected to a square-shaped head with a side of $2W$, which was designed to act as a domain wall source. In each wire, necks of different widths were introduced as artificial pinning sites of a domain wall. Magnetization reversals in very narrow wires with 0.5 μm width were clearly observed. It was confirmed that domain wall penetration, pinning, depinning, and also the direction of wall motion can be controlled by using square-shaped head and necks with optimized width. The Kerr microscope image with the domain wall near the neck is almost consistent with the Kerr effect image obtained by micromagnetic calculation.

Key words: magnetic domain wall, Kerr microscope, ferromagnetic wire, micromagnetic calculation

1. はじめに

電子線リソグラフィ法やエッチング法により微細構造を反映した特異な磁区構造を有する磁性体の作製が可能になった。この手法を用いて、磁性細線や磁性体微粒子の研究が盛んに行われている¹⁾。その中でサブミクロンサイズの線幅を有する磁性細線の磁区構造と電気伝導との関係は未知な点が多く、興味を持たれている^{2)~5)}。細線中の磁区構造を制御するために、細線の線端にパッド (pad) を付与したり⁶⁾、細線の形状をジグザクにしたり⁷⁾、あるいは細線の中央部に括れを付与するなど^{3,8)}の工夫がなさ

れている。これらの細線の磁区構造は一般に磁化曲線の形状や磁気抵抗効果の磁場依存性により推測されている。実際の磁区構造については、透過電顕や磁気力顕微鏡 (MFM) による報告がある³⁾。透過電顕は磁壁の構造が観察できるほど高分解能であるが、観察試料を極薄膜にする必要があるために、磁気抵抗などの他の物理測定との直接の対応は難しい。MFMは特殊な環境や試料の前処理を必要とせず、サブミクロンサイズの磁区構造の観察には最適であるが、プローブ (MFM探針) からのもれ磁場によって試料の磁化状態が変化するという問題がある。また、外部磁場を印加するとプローブの磁化状態が変化することもある。簡便な偏光顕微鏡で磁区構造の観察ができれば、磁場を印加し、電気抵抗を測定しながら磁区構造の観察も可能となり、電気抵抗と磁区構造の明確な関係を得ることができと考えられる。

今回、我々は偏光顕微鏡を用いて微細加工を施した強磁性細線の磁化過程の観察を行い、幅0.5 μm の磁性細線の磁化反転の観察が偏光顕微鏡によって可能なこと、および細線に括れなどの加工を施すことにより磁性細線内における磁壁の進む方向や位置の制御が可能であることを示す。

2. 実験

2-1 偏光顕微鏡

面内磁区の観察に使用した顕微鏡システムはFig.1に示すように、倒立偏光顕微鏡、CCDカメラ、画像処理からなっている。100WのHgランプの光はP偏光になるようにポラライザーによって偏光され、角度をもって試料に入射する。この角度は縦カー効果を得るのに必要であり、光

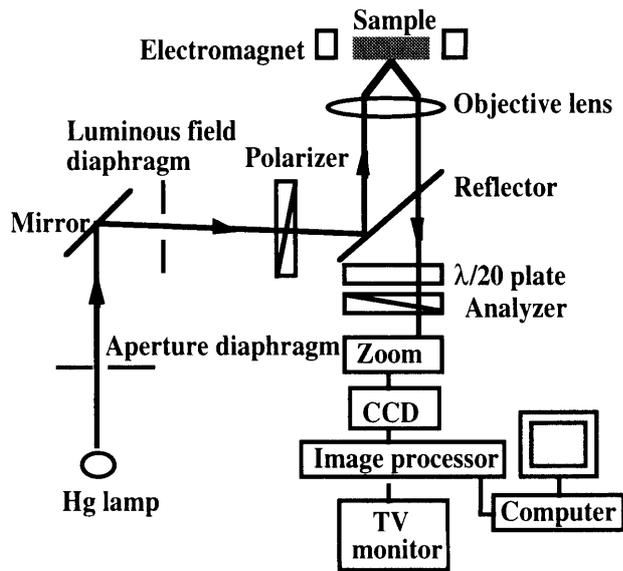


Fig. 1 Kerr microscope for observing of in-plane magnetic domains. A 100-W Hg lamp was used as a light source and a 100X oil immersion objective lens having a numerical aperture of 1.3 was used for imaging.

源とポライザーの間におかれたミラーによって制御されている。大きい入射角度は大きい開口数 ($NA=1.3$) を有している $\times 100$ の油浸対物レンズで得られる。試料からの反射光は位相補償板 ($\lambda/20$) と検光子を通過する。位相補償板は試料で反射したことにより生じた楕円偏光を直線偏光に、検光子は縦カー効果のコントラストが最適になるようにそれぞれ調整される。顕微鏡の試料台には細線の長さ方向に最大200 Oeの磁場の印加が可能な電磁石が設けられている。画像はCCDカメラで受け、画像処理により背景画像を減じることで得られる。背景画像には常に磁化の飽和状態を用いた。

2-2 NiFe細線試料

NiFe細線試料は高解像度電子線リソグラフィーを用いたリフトオフ法により以下の手順で作製された。(1) まず、 SiO_2 層を持ったSi基板上にCu層を堆積し、その上にレジスト膜を形成する。(2) 細線パターンを描画し、感光させ、レジストの溶解除去を行う。(3) 次に、200 ÅのNiFe (Ni:Fe=80:20) 膜を堆積する。(4) 最後に再度レジスト層を取り除く。Cu層は細線と基板間の光学定数の差を小さくすることから、偏光顕微鏡による細線の観察において、エッジからの散乱を小さくするのに有用である。本実験で用いた細線は、長さを50 μm とし、幅 W を0.5 μm 、1.0 μm および2.0 μm の3種類とした。細線の一端には細線に磁壁を導入するための1辺が線幅 W の2倍、すなわち $2W$ の大きさの正方形の磁壁溜を設け、さらにそれぞれの細線に2つの括れを付与した。磁壁溜のある側の括れの幅を0.2 W 、0.6 W および0.8 W と、細線幅に応じた一定の割合で変化させた。反対側、すなわち磁壁溜を持たない側

の括れの幅を0.2 W と一定とした(参考: Fig.2(a'))。磁壁溜の効果を明らかにするために、同じ大きさの2つの括れを持ち、磁壁溜を持たない細線もそれぞれ作製した。

3. 実験結果

各細線について、細線への磁壁の侵入磁場、磁壁溜の付与による磁壁の侵入磁場の変化および括れを付与することによる磁壁の運動への影響を調べた。Fig.2には、一例として磁壁溜と幅0.8 μm (0.8 W) と0.2 μm (0.2 W) の括れを有する幅1.0 μm の細線の偏光顕微鏡像の磁場変化(a)-(c)、およびこれらの磁区構造の模式図(a')-(c')を示す。図には括れの位置、幅および印加磁場 H_{ex} の値を記した。測定は細線の軸方向に150 Oeの磁場を印加することによって磁化を一方向へ飽和させた後、磁場を零とし、磁区像をモニター画像で観察しながら、逆方向に磁場を印加して行った。細線への磁壁の侵入および移動は常に瞬間的であった。すなわち、Fig.2(a)に示した逆方向の磁場 H_{ex} で一気に磁壁溜から幅0.8 μm の括れまで磁化が反転し、さらに(b)に示した磁場で幅0.2 μm の括れまで磁化が反転し、最後に(c)に示した磁場で反転は終了した。(c)における磁化の反転は磁壁溜を有しない細線の端からであることが、同じ大きさの2つの括れを持ち、磁壁溜を持たない細線についての、同様の実験から確かめられた。これらの実験により、磁壁溜および括れを付与することにより、細線への磁区の侵入磁場の制御、および侵入方向の制御が可能であることが分かる。

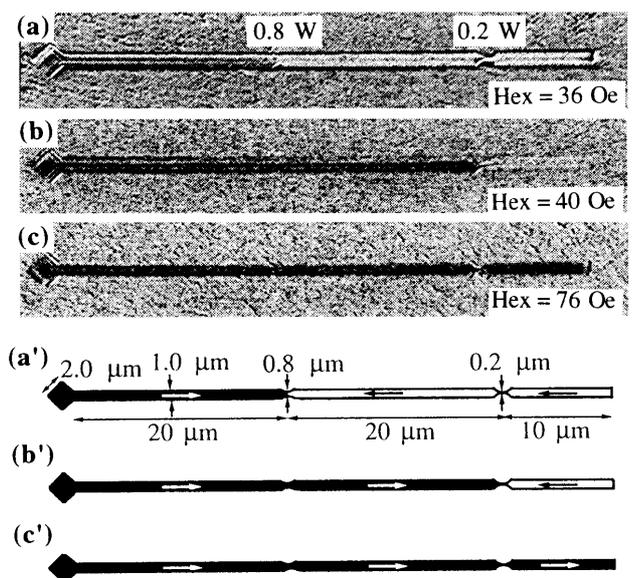


Fig. 2 Change in the Kerr microscope image for the 1.0- μm wide wire, and a schematic illustration of the domain structure. The photographs were taken in inverse fields H_{ex} after a magnetic field of 200 Oe was applied along the wire axis. (a'), (b'), and (c') are diagrammatic representations of images (a), (b), and (c).

Figs.3(a)-(b)には、幅0.5 μm の細線の偏光顕微鏡像の磁場による変化の例を示す。この細線は磁壁溜と幅0.3 μm (0.6 W) と0.1 μm (0.2 W) の括れを有している。高倍率の測定のため右端と0.1 μm の括れは画面の外に出てしまっている。(a')-(b')は磁区構造の模式図である。この図は0.5 μm の幅の細線において、偏光顕微鏡により磁化の反転が十分に観察できることを示している。

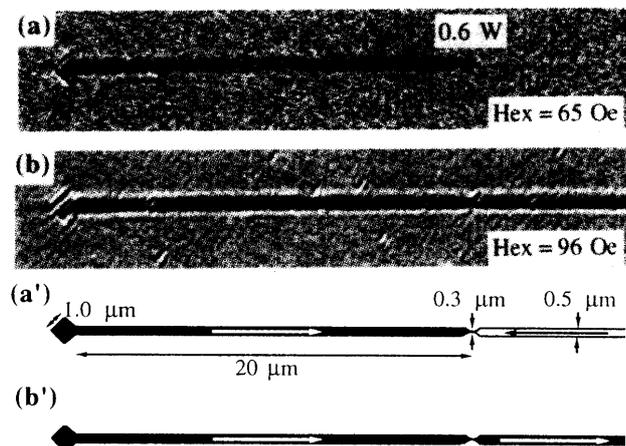


Fig. 3 Kerr microscope image of the domain pattern for the 0.5- μm wide wire and a schematic illustration of the domain structures. This picture shows only the left half of the wire.

Fig. 4 には、このようにして求めた各細線への磁壁の侵入磁場を示す。侵入磁場はいずれの細線においても磁壁溜を付与することによって減少している。細線への磁壁の侵入磁場は膜厚が一定のとき、線幅に反比例することが知られている¹⁰⁾。磁壁溜のあるものについては侵入磁場はほぼ線幅に反比例している。磁壁溜のない細線については、線幅が小さくなったときに侵入磁場が飽和する傾向にあるが、これは初期状態にするために印加した磁場 (0.5 μm で200 Oe) が不足していたことに起因する可能性が考えられる。

各細線について 残留磁化状態での磁壁溜の磁区構造を MFMによって調べた。残留磁化状態は細線に平行に1 kOeの磁場を印加したのちに零磁場に戻すことにより得られた。得られた磁壁溜のMFM像は、環流中心を有しない構造と1つの環流中心を有する構造の2つのタイプに分類できることが分かった。幅2.0 μm および1.0 μm の細線の磁壁溜では主に環流中心を有する構造であるのに対し、幅0.5 μm の細線では環流中心を有しない構造が主であった。Fig.5に幅0.5 μm の細線の磁壁溜の代表的なMFM像を示す。

Fig.6には、各細線について大きさの異なる括れ (括れ幅 = 0.8 W ~ 0.2 W) を通過するのに必要な磁場 (ピンニング磁場) の値を示す。幅2.0 μm の細線については括れ幅の減少に伴いピンニング磁場の増加が見られるが幅1.0 μm および0.5 μm の細線についてはいずれも0.6 W以

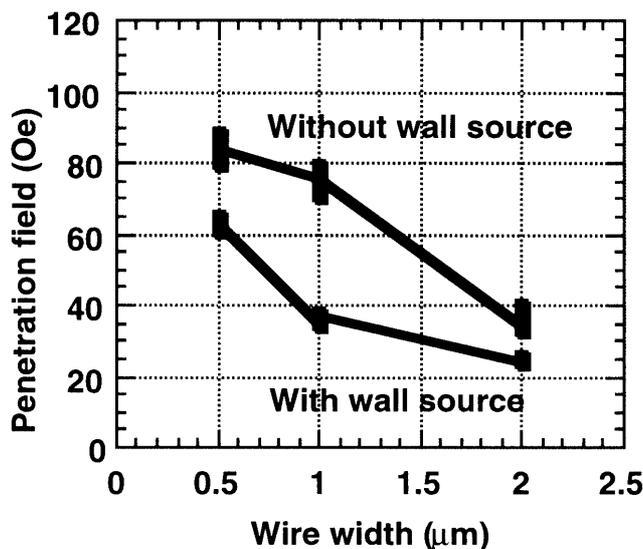


Fig. 4 Wire width dependence of the magnetic field required to make the wall penetrate into the wire from the edge end with and without a wall source.

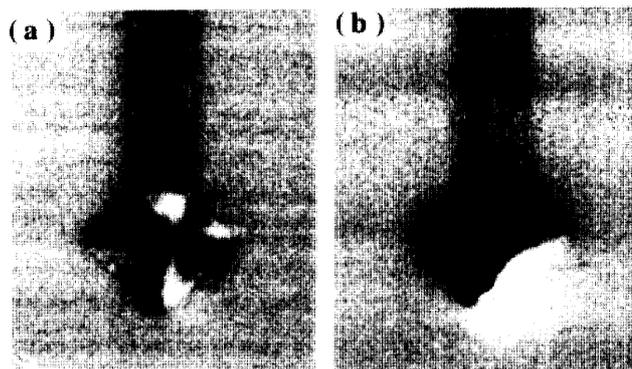


Fig. 5 Typical MFM images of the wall sources of 0.5- μm wide wires.

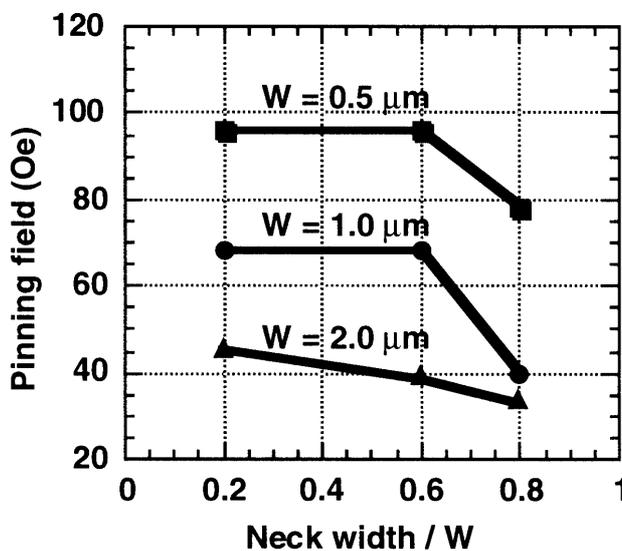


Fig. 6 Neck width/w dependence of the pinning field for each wire width.

下で一定値を示した。

マイクロマグネティクス計算を用いて、細線へ導入された単一磁壁の構造を見積もった。計算機シミュレーションは、薄膜試料を2次元の正方格子に分割した上でLandau-Lifschitz-Gilbert方程式を実空間上で4次の(Runge-Kutta法を用いて積分することにより行われた^{11,12)}。計算に用いた試料は厚さ10 nm, 幅302.2 nm, 長さ1209 nmのFeNi細線で、交換ステイフネス定数 $A_{ex}=0.92 \cdot 10^{11}$ J/m, 飽和磁化 $M=1.08$ T, ジャイロ磁気定数 $\gamma=-2.34 \cdot 10^5$ mA¹s⁻¹とした。Figs.7 (a)~(c)に示したような3種類の磁壁構造を仮定し、そのエネルギーを求めた結果、(a)は141 eV, (b)は163 eV, (c)は130 eVとなった。(a)と(c)のエネルギー差は、線幅を太くすることにより大きくなる傾向にある。これより実験で観察された磁壁は一つあるいは複数の環流中心を持つNeel磁壁と考えられる。

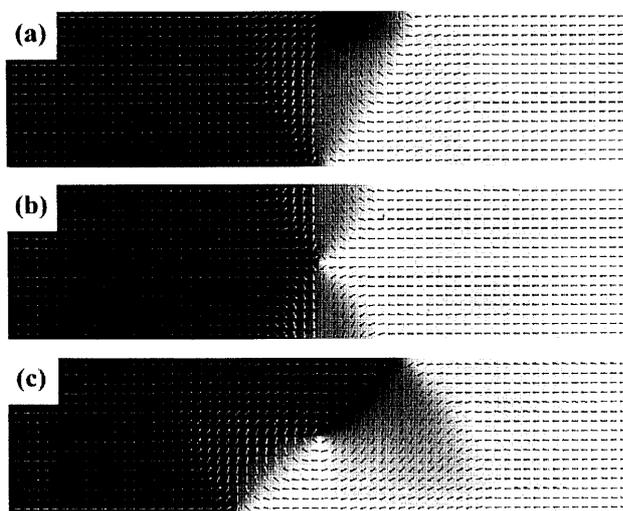


Fig. 7 Several stable magnetic wall structures: (a) transverse Neel wall, (b) twin Neel wall with contracirculating vortex, and (c) vortex wall.

幅 $2.0 \mu\text{m}$ の細線について、括れ付近の磁壁の磁場による変化を偏光顕微鏡で調べた。先に示したように、磁壁は常に磁壁溜から一気に括れ付近まで侵入する。Fig.8 (a)に磁場の印加により括れ付近まで侵入した磁壁、(b)にはFig.7 (c)に示した一つの環流中心を持つ構造に対応する偏光顕微鏡像を示す。顕微鏡像には斜めに白黒の境界が観察され、計算された構造と矛盾しない。

5. まとめ

(1) 面内磁化を有するNiFe細線において、幅 $0.5 \mu\text{m}$ の細線の磁化の反転を偏光顕微鏡で観察できた。

(2) 細線の端に正方形の磁壁溜を付与することにより、細線中への磁壁の侵入磁場を制御出来ることを示した。

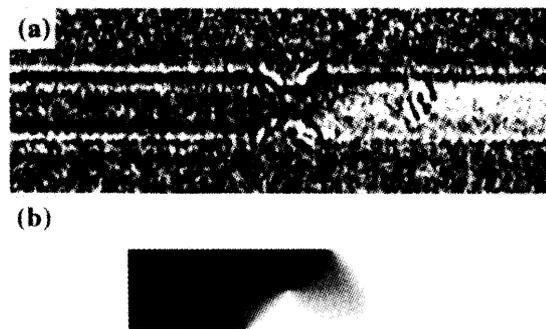


Fig. 8 (a) Kerr microscope image near the neck for the $2.0\text{-}\mu\text{m}$ wide wire and (b) calculated Kerr effect image for the domain structures shown in Fig. 7 (c).

(3) 細線に括れを付与することにより、細線内の磁壁の位置を制御することができることを示した。

(4) 磁壁溜と括れの大きさを考慮することにより磁場による磁壁の侵入方向の制御も可能であることを示した。

(5) 細線内の磁壁付近の磁区構造は、静磁エネルギーと交換エネルギーの競合から計算により見積られる結果と矛盾しない。

文献

- 1) 大谷義近, 深道和明: 日本応用磁気学会誌, **21**, 129 (1997).
- 2) K. Hong and N. Giordano: *J. Magn. Magn. Mat.*, **151**, 396 (1995).
- 3) Y. Otani, K. Fukamichi, O. Kitakami, Y. Shimada, B. Pannetier, J. P. Nozieres, T. Matsuda and A. Tonomura: *Proc. MRS Spring Meeting, Symposium, San Francisco*, **475**, 215 (1997).
- 4) U. Ruediger, J. Yu, S. Zhang, A. D. Kent and S. S. P. Parkin: *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 5639 (1998).
- 5) 大谷義近, 金 承九, 深道和明: 日本物理学会誌, **54**, 528 (1999).
- 6) K. Shigeto, T. Shinjo and T. Ono: *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2815 (1999).
- 7) 谷山智康, 中谷 功, 山崎陽太郎: 固体物理, **34**, 777 (1999).
- 8) T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoi, and T. Shinjo: *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 1116 (1998).
- 9) N. Hayashi, K. Saito and Y. Nakatani: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 6065 (1996).
- 10) A. O. Adeyeye, J. A. C. Bland, C. Daboo, Jaeyong Lee, U. Ebels, and H. Ahmed: *J. Appl. Phys.*, **79**, 6120 (1996).
- 11) R. D. McMichael and M. J. Donahue: *IEEE Trans. Magn.*, **33**, 4167 (1997).
- 12) 能崎幸雄, 松山公秀, 小野輝男, 宮島英紀: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1121 (1999).