

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	スピントランスファートルクによる磁壁駆動を用いた磁性細線メモリの記録・再生制御に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	奥田光伸
Author(English)	Mitsunobu Okuda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10477号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中川 茂樹,岩本 光正,山田 明,間中 孝彰,PHAM NAM HAI
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10477号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

学位論文

スピントランスファートルクによる
磁壁駆動を用いた磁性細線メモリの
記録・再生制御に関する研究

指導教官 中川 茂樹 教授

東京工業大学大学院理工学研究科
電子物理工学専攻

奥田 光伸

目次

第1章 序論	7
1. 1 超高速ストレージの要求	7
1. 2 論文の構成	9
第2章 スピントランスファートルクによる磁壁駆動と磁性細線メモリ	10
2. 1 磁区と磁壁	10
2. 2 スピントランスファートルクによる磁性細線中の磁壁駆動	12
2. 3 磁壁駆動を用いたメモリ	14
2. 3. 1 レーストラックメモリ	14
2. 3. 2 3端子 MRAM	15
2. 3. 3 提案する磁性細線メモリ	16
2. 4 垂直磁気記録と磁気ヘッドの構造	19
2. 5 磁気ヘッドを用いた磁性細線記録素子	22
第3章 垂直磁化磁性細線の作製	23
3. 1 [Co/Pd]垂直磁化膜の作製	23

3. 2	[Co/Pd]磁性細線の作製プロセス	25
3. 3	[Co/Pd]磁性細線の構造	26
3. 4	[Co/Pd]磁性細線の細線幅の最適化	28
3. 5	まとめ	29
第4章 磁性細線における電流磁区駆動と検出技術		30
4. 1	電流駆動磁区の検出法	30
4. 1. 1	異常ホール効果による駆動磁区検出法	30
4. 1. 2	磁気光学効果による駆動磁区検出法	32
4. 1. 3	磁気ヘッドによる駆動磁区検出法	34
4. 2	[Co/Pd]磁性細線における電流磁区駆動	37
4. 3	磁気ヘッドを用いた電流磁区駆動検出実験	41
4. 4	まとめ	45
第5章 磁気ヘッドによる磁性細線への磁区形成		46
5. 1	記録ヘッドによる磁区形成検証実験の手順	46
5. 2	磁区形成実験結果	47
5. 3	まとめ	51

第6章	磁性細線への磁区の記録・駆動・再生	52
6.1	磁区記録・駆動・再生実験における測定装置の構成	52
6.2	[Co/Pd]垂直磁化磁性細線における磁区の記録・駆動・再生実験	54
6.3	軟磁性下地層(SUL)を持つ磁性細線の作製と磁区形成条件の検証	58
6.4	SULを持つ[Co/Pd]垂直磁化磁性細線における磁区の記録・駆動・再生実験	61
6.5	まとめ	64
第7章	磁区駆動制御技術と高速駆動の検討	65
7.1	磁壁トラップサイトによる磁区駆動距離制御の検討	65
7.1.1	くびれ形状による磁壁トラップサイト	65
7.1.2	陽極酸化による磁壁トラップサイト	70
7.1.3	くぼみによる磁壁トラップサイト	72
7.1.4	段差による磁壁トラップサイト	74
7.2	高速磁区駆動の検討	80
7.3	磁気ヘッドのヒーター利用による記録効率の改善	83
7.4	まとめ	86
第8章	結論	87
8.1	結論	87
8.2	今後の展望	90

謝辞.....	91
参考文献.....	92
研究業績.....	96

第1章 序論

1.1 超高速ストレージの要求

近年、カメラやディスプレイの解像度の高精細化に伴い、現行のハイビジョン放送を超える 4K や 8K の解像度に対応したスーパーハイビジョン放送の実現に向けた検討が行われている。2016 年には衛星放送において 4K・8K 試験放送がすでに開始されており、2018 年までに 4K・8K 実用放送が開始される予定となっている[1]。

画素数が約 3,300 万、フレームレートが 120 Hz のフル解像度非圧縮の 8K スーパーハイビジョン映像[1]-[4]を記録するためには 144 Gbps[1]-[3]を超える超高データ転送速度が必要となり、さらに将来の立体映像を記録するためには、より高速なデータ転送速度が映像ストレージに求められることが想定される。現状の記録デバイスであるハードディスクドライブ(HDD)は、ディスクの回転機構やヘッドの位置合わせ機構などの機械的動作速度に律速され、データ転送速度を飛躍的に向上させることは難しく、非圧縮のスーパーハイビジョン映像を記録するためには非常に多くのドライブを並列に接続し動作させる必要がある。HDD に関する研究動向において、記録容量の大容量化については、磁気データを信号トラック上に瓦を重ね合わせるように少しずつ重ねながら記録するシングル磁気記録方式[5], [6]、レーザーなどによる熱のアシストを用いて熱安定性の高い媒体により小さな磁区を記録する熱アシスト磁気記録方式[5], [7], [8]、外部から加えるエネルギーとしてマイクロ波を照射することで高密度記録だけでなく、多層磁気記録まで視野に入れた高周波アシスト記録方式[5], [9], [10]など新たな磁気記録技術の実現が着実に進められている。しかし、データ転送速度の高速化については SSD (Solid State Drive) 等の半導体メモリが先行していることもあり、容量の増加ほどは進んでおらず、HDD を用いて小型の非圧縮スーパーハイビジョン映像記録装置を実現することは難しい。一方、現状では高速な SSD (Solid State Drive) ですら、わずか数 Gbps の転送速度にしか到達しておらず、144Gbps の転送速度を実現するためには、高速な SSD を用いたとしても数 10 ~ 100 台程度の記録装置を並列に

動作させる必要があり、消費電力や装置サイズを考慮すると、機動性の高い番組制作を実現するうえでは現実的ではない。

本来、磁気記録は非常に安定であるだけでなく、記録時の磁化反転に限ってみれば半導体メモリと比べても非常に高速な記録方法である。HDDの機械的な動作部分を無くし、例えば磁気データを全て電氣的にアクセスすることが可能となれば、非常に高速で高信頼性を持つ不揮発性の磁気メモリの実現が期待できる。近年の研究において磁性材料を幅数百ナノメートルに加工した細線の長さ方向に電流を印加したときに、その磁性細線内部に存在する磁区が高速に移動する現象[11]-[14]が注目されており、これを利用したレーストラックメモリ[12]や磁壁移動型MRAM[15], [16]に代表される新しい原理の磁気メモリの研究が進められている。

この磁区電流駆動の高速性を利用した映像用ストレージを実現するために、本論文では磁性細線を複数並列に並べ、その磁性細線中にデータを同期して記録再生を行うことのできる高速磁性細線記録デバイスを提案している。これは磁性細線1本に1対の記録素子と再生素子をその両端に有する構造からなり、その磁性細線記録素子を複数並べたものである。この磁性細線記録素子の動作を実証するため、1本の磁性細線上でデータの記録再生動作を目指すこととした。本研究では記録素子と再生素子として磁気ヘッド中の記録ヘッド、再生ヘッドを利用し、磁気ヘッドを磁性細線上に固定することにより仮想的な磁性細線記録素子を構成し、電流印加によって働くスピントランスファートルクによる磁壁駆動を用いた磁性細線メモリの記録・再生制御に関する研究を行った。

1.2 論文の構成

2章「スピントランスファートルクによる磁壁駆動と磁性細線メモリ」ではスピントランスファートルクによる磁壁駆動のしくみとそれ磁壁駆動を用いた磁性細線メモリについて紹介した。3章「垂直磁化磁性細線の作製」では本研究で利用した垂直磁化[Co/Pd]磁性細線の磁気特性の評価と細線への加工、加工後の磁気特性について評価した。4章「磁性細線における電流磁区駆動と検出技術」では[Co/Pd]磁性細線において磁区がスピントランスファートルクにより電子の流れる方向に電流駆動することを確認するとともに、磁気ヘッドを用いた磁区駆動検出装置を構築し、磁区駆動の様子をリアルタイムに検出できることを実証した。5章「磁気ヘッドによる磁性細線への磁区形成」では記録ヘッドにより磁区形成できる条件を検証し、ヘッドー磁性細線間のギャップを縮めることにより磁区形成が可能であることを示した。6章「磁性細線への磁区の記録・駆動・再生」では4章と5章の磁区の駆動検出技術と磁区形成技術を組み合わせ、一連の動作で磁区の記録・駆動・再生が可能であることを実証した。また、軟磁性下地層を付与することにより磁区形成が確実にできることを示した。7章「磁区駆動制御技術と高速駆動の検討」では磁性細線メモリを実現するための磁区駆動制御手法と磁区の電流駆動の高速化に向けた材料の検討を行った。8章「結論」では本研究で得られた結果をまとめるとともに研究を続ける上での課題や将来の展望について述べた。

第2章 スピントランスファートルクによる磁壁駆動と磁性細線メモリ

本章では本研究で扱うメインの物理現象であるスピントランスファートルクによる電流誘起磁壁移動に関して詳述する。まず、磁区および磁壁の定義を与え磁壁電流駆動の理論について述べた後、最後に電流誘起磁壁移動を利用したメモリなどの応用例について紹介する。

2.1 磁区と磁壁

一般に強磁性体の内部は、複数の「磁区」と呼ばれる磁気モーメントが揃った単位領域に分割されている[17]。図 2-1 にその模式図を示す。それぞれの磁区内では自発磁化が1方向に揃っているが、磁区それぞれの磁化方向は揃ってはならず、全体の磁化としては0となることもある。磁性体内部が磁区にわかれるのは磁極間に反磁界が働くことによる。内部が複数の磁区に分かれることにより内部の反磁界が打ち消しあい、静磁エネルギーが低くなることで安定な状態となる。また、非常に微小な構造では単磁区の状態の方が複数磁区にわかれるよりもエネルギーが低くなることもある。磁区と磁区との境界部分は、「磁壁」と呼ばれる磁気モーメントが緩やかに連続的に回転している遷移領域となっている。面内で回転する磁壁をネール磁壁、面に垂直な方向に回転する磁壁をブロッホ磁壁という。磁気記録媒体として用いられる磁性体では、その内部の磁区の磁化方向が安定に2値を取りうるように設計されているため、例えば、磁気ヘッドなどから発生する局所磁界を用いて、特定の磁区の磁化方向を反転させることによって情報記録が行われる。

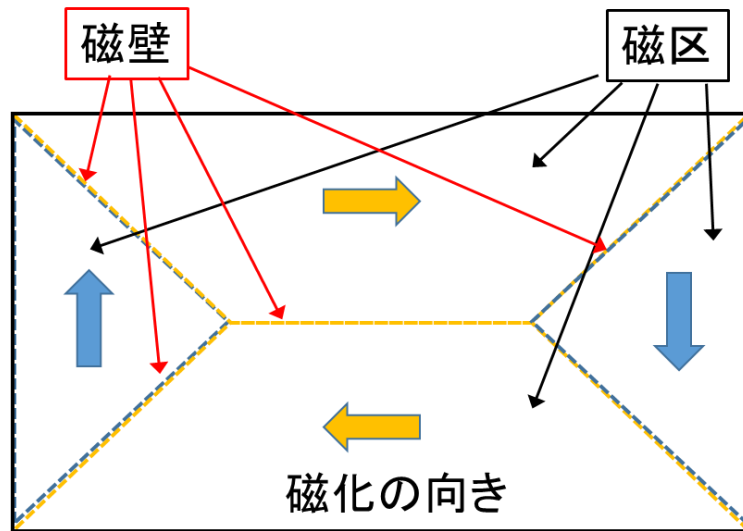


図 2-1 磁性体の磁区構造の模式図

2.2 スピントランスファートルクによる磁性細線中の磁壁駆動

磁壁はある幅の中で、スピンの向きが1方の磁区のスピン方向からもう1方の磁区のスピンの向きへと連続的に遷移している領域ともいえる。電流によりこの磁壁が移動する現象は電流誘起磁壁移動とよばれ、1984年にBergerによって強磁性体中を流れるスピン偏極電流により磁壁が動く可能性について提唱された[18]。図2-2の模式図を用いて電流誘起磁壁移動現象を説明する。まず、磁化方向が 180° 異なる磁区と磁区に挟まれてできた磁壁を持つ強磁性体の細線に電流を流した場合を考える。この細線に電流を右から左へ流すと、電流を担う伝導電子は電流の向きと逆方向の左から右の方向へ磁壁を横切るように移動する。このとき、伝導電子のスピンはs-d相互作用によって磁気モーメントに沿って回転しスピンの方向が変化する。このことは伝導電子のスピン角運動量に変化したことを示している。角運動量保存則から、ここで変化した角運動量は、相互作用の相手である磁壁中の磁気モーメントへ移動することになる。その結果として磁壁中の磁気モーメントが回転し、電子の移動する方向へ磁壁が移動する。この伝導電子から磁壁部分の磁気モーメントに働くトルクは、スピントランスファートルク[17], [19], [20]とよばれる。

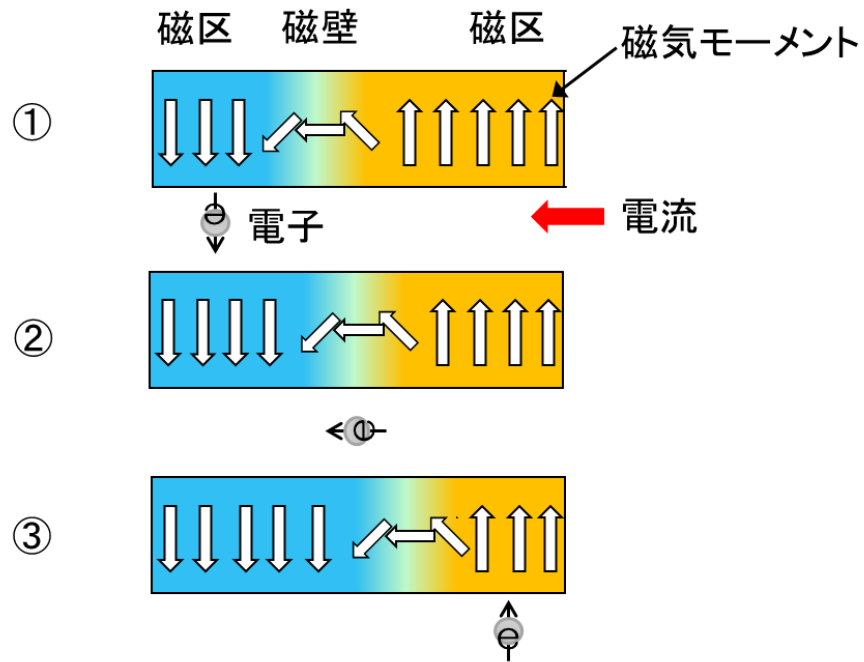


図 2-2 スピントランスファートルクによる磁壁移動を示した模式図

2.3 磁壁駆動を用いたメモリ

この電流誘起磁壁駆動現象を利用したデバイスとして提案されているものをここで紹介する。最初に IBM の提案したレーストラックメモリ[12]、NEC のグループが提案した3端子MRAM[15]、[16]、そして本論文で提案している並列型の磁性細線メモリについて紹介する。

2.3.1 レーストラックメモリ

レーストラックメモリは IBM から提案された、ハードディスクドライブを超える記録容量を可動部のない素子によって実現するメモリである。図 2-3 に示す構造の実現を目指しており、データを蓄積する磁性細線と書込み、読み出しを行う素子からなる。書込み素子により磁性細線に形成される磁区が、細線中を流れる電子によるスピントランスファートルクにより電子の移動する方向に駆動する。細線中に蓄積されたデータは磁気トンネル接合素子 (MTJ) 等を用いて読み出す。この磁性細線を 3 次元型に構成することで高速化と大容量化の両立を目指している。レーストラックメモリは可動部品がないために機械的に摩耗せず、半導体メモリと異なり記録されるデータは磁気情報のため、無限に書き換えを行うことができるという特長がある。

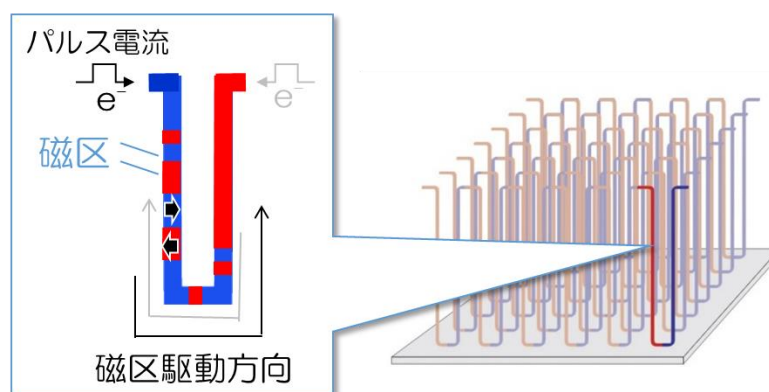


図 2-3 レーストラックメモリの構造

2.3.2 3端子MRAM

3端子MRAMは2つのトランジスタと1つの磁性体素子からなるMRAMである。この磁性体素子の部分に電流誘起磁壁駆動技術を用いたデバイスが提案されている。図2-4にその素子構造を示す。左右にある磁化を固定したスピン注入源間の磁壁移動領域を磁壁が移動することによって、“0”と“1”の情報を記録する仕組みとなっている。両端にあるスピン注入源を通過した電子はスピン偏極し、磁壁部分を通った際に磁気モーメントへ駆動トルクを与え、磁壁が移動する。こうして、磁性体素子の中心部分の磁化方向を変化させることができる。情報の読み出しは磁壁移動部の磁化反転によるMTJの磁気抵抗変化により行う。2端子型のMRAMと比較し、動作速度の大幅な向上が見込めるものの、一般的な2端子型のMRAMの方が構造が単純である分、大容量化には適している。

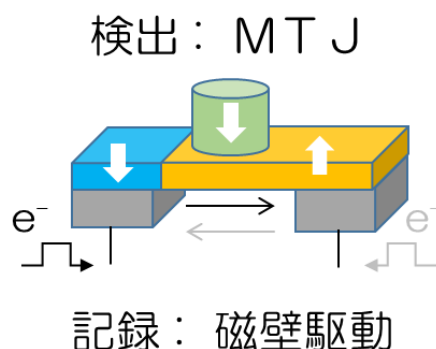


図2-4 3端子MRAMの素子構造

2.3.3 提案する磁性細線メモリ

本研究においても磁壁の電流駆動を利用した磁性細線メモリを提案しており、その概念図を図 2-5 に示す。この磁性細線メモリは 1 本の磁性細線の両端部に記録素子と再生素子を配置した磁性細線記録素子が複数並列に配置される。この磁性細線記録素子におけるデータの記録・再生手順について図 2-6 に示す。まず記録素子によりデータは上向きまたは下向きに磁化された磁区として細線中に記録される。次に記録された磁区を磁性細線の長さ方向に印加した電流により記録素子と再生素子の間をシフト移動させて、空いた領域に磁区を記録する。これを繰り返すことで磁性細線の長さ方向にシーケンシャルな情報を蓄積することができる。情報を再生するには磁性細線に連続的にパルス電流を印加し、再生素子まで蓄積された磁区を移動させることで元のデータが再生される。ただし、再生素子を通過した磁気データを保存するためには再び記録素子によって情報を磁性細線へ書き戻す必要がある。このような磁性細線記録素子を多数配置して同期駆動することにより高速化を図ることが可能となる。順次情報を磁性細線中にそのままの順番で記録するため映像情報などのシーケンシャルデータの保存に適している。本研究では 1 本の磁性細線記録素子でデータの記録再生動作が可能であるのかを実証するため、磁気ヘッドを用いて内在する記録ヘッド、再生ヘッドをそれぞれ記録・再生素子とし、仮想的な磁性細線記録素子を構成することとした。

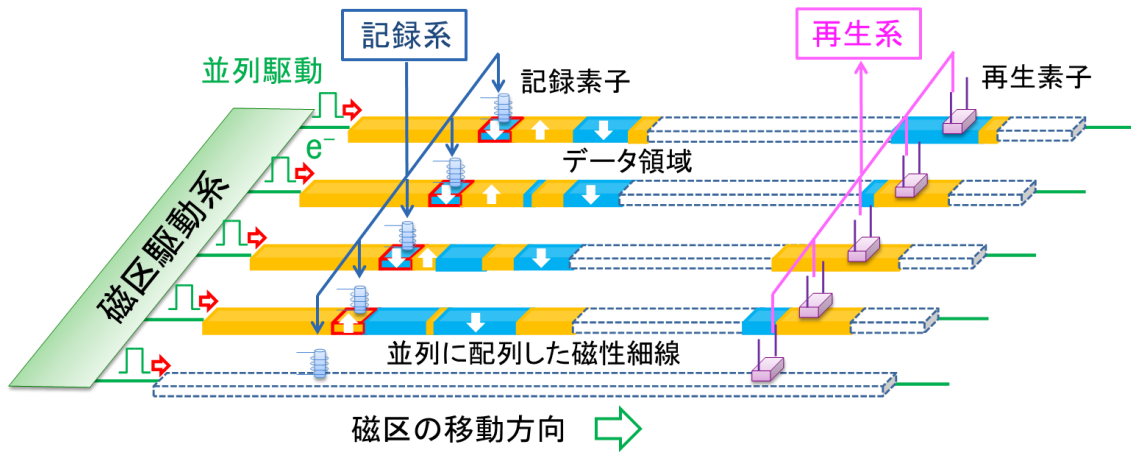


図 2-5 本研究で提案する磁性細線メモリの概念図

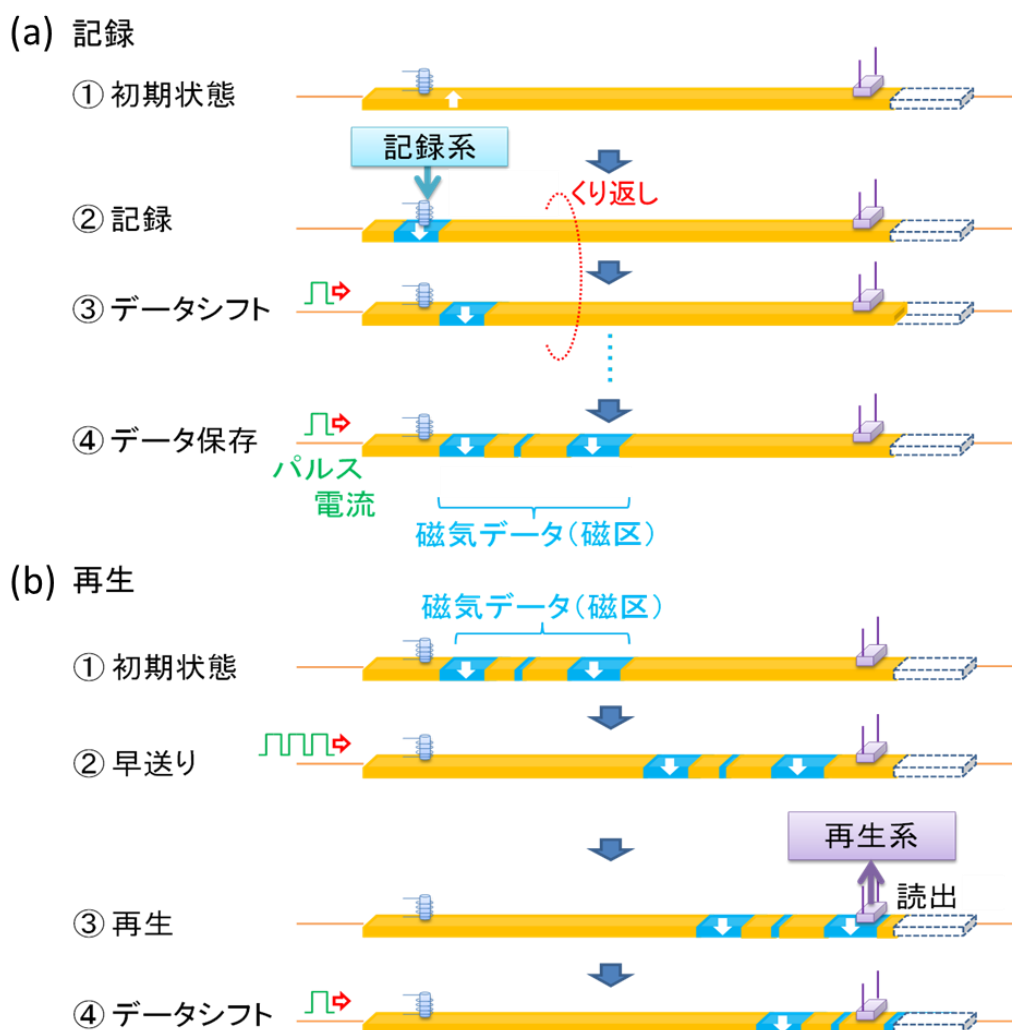


図 2-6 磁性細線記録デバイスにおける (a) 記録・(b) 再生手順の模式図

2.4 垂直磁気記録と磁気ヘッドの構造

この磁性細線記録素子を構成するため、本研究ではハードディスクドライブの垂直磁気記録に利用される磁気ヘッド中の記録ヘッドおよび再生ヘッドをそれぞれ記録素子、再生素子として用いることとした。垂直磁気記録の仕組みは図 2-7 で示される。垂直磁気記録用単磁極ヘッドは記録磁界の発生源である主磁極とこれを励磁するコイル、主磁極からの磁束を導く軟磁性裏打ち層とともに閉磁路を形成するリターンヨークからなる[21]。コイルにより励磁され主磁極から発生する磁界の主に垂直成分により記録媒体に磁区が記録される。この磁区の磁化方向を読み出すのが再生ヘッドである。再生ヘッドは磁気抵抗効果を利用したもので、記録媒体に記録された磁化からの漏れ磁束により再生ヘッドの磁性膜の磁化が回転する。このことにより再生ヘッドの抵抗値が変化するため、記録媒体に記録された磁区の磁化方向を検出することができる。再生ヘッドはその直下の信号のみを検出できるようにするため、磁気シールドに挟まれた構造を持つ。

垂直磁気記録に用いられるこの磁気ヘッドの記録媒体に接する面、いわゆる ABS (Air Bearing Surface) 面の走査型電子顕微鏡像を図 2-8 に示す。三角の形に見えているのが記録ヘッドの磁極である。大きさは約 40 nm でここから発生する磁場により磁気データを記録することができる。その周りがリターンヨークとよばれる磁性層の部分である。この記録ヘッドから 4.5 μm 内側に再生ヘッドがある。シールドに挟まれたおよそ 30 nm の大きさの素子となっている。この磁気ヘッドと垂直磁化磁性細線を組み合わせて仮想的な磁性細線記録素子を構築することとした。

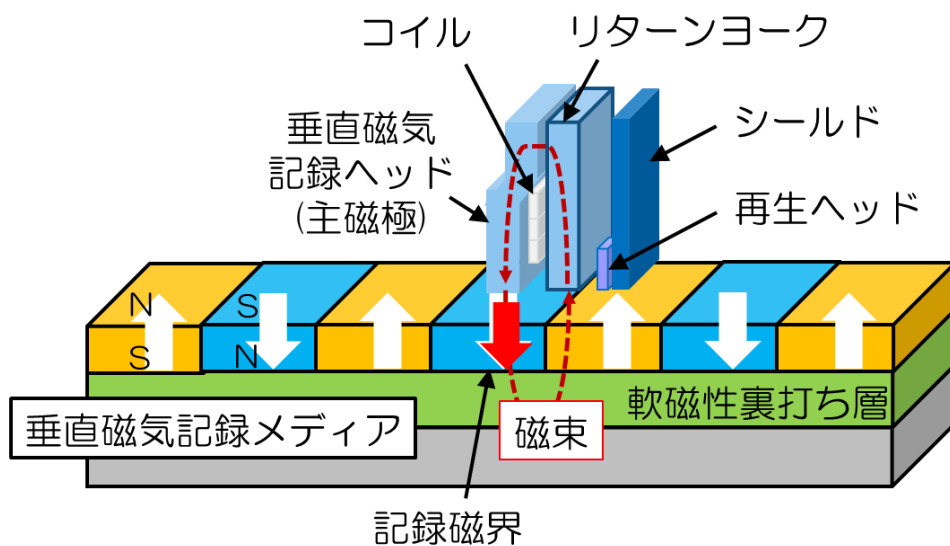


図 2-7 ハードディスクドライブにおける垂直磁気記録の概念図

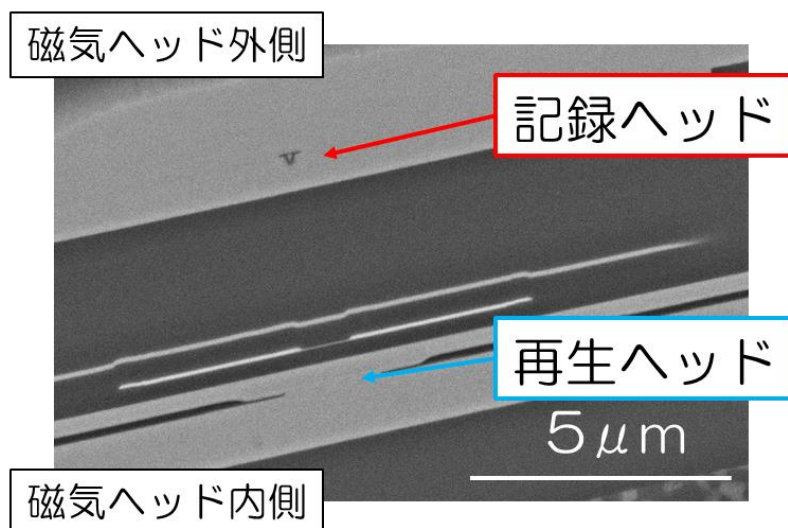


図 2-8 本研究で用いた磁気ヘッドの
ABS 面の走査型電子顕微鏡像

2.5 磁気ヘッドを用いた磁性細線記録素子

図 2-9 は記録ヘッドと再生ヘッドを磁性細線上に一直線上に並ぶ形で固定して構築した磁性細線記録素子の概念図である。記録ヘッドー再生ヘッド間の $4.5\ \mu\text{m}$ の領域にわたる磁性細線に磁区を記録し、その磁区を電流によるスピントランスファートルクにより動かし、再生ヘッドで検出することができれば、この磁性細線記録素子が記録デバイスとして機能することを実証できる。この素子を構成するため、まず垂直磁化磁性細線を作製した後、細線中の磁区の電流駆動を検証し、再生ヘッドによる駆動磁区の検出、記録ヘッドによる磁区の形成という順に研究を進めていくこととした。

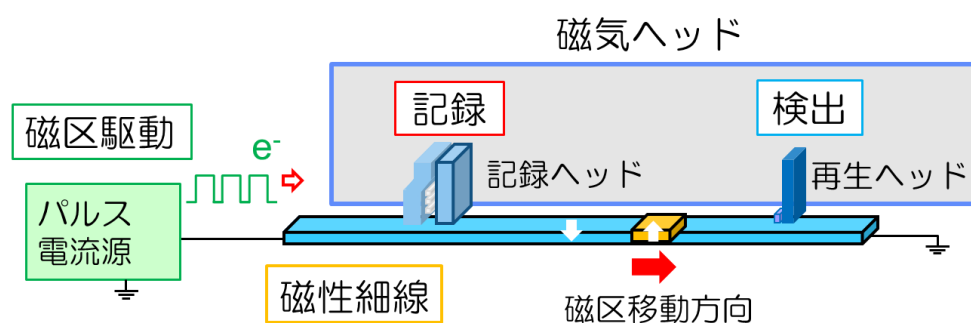


図 2-9 本研究で構築する磁性細線記録素子の概念図

第3章 垂直磁化磁性細線の作製

磁性細線中の電流磁壁駆動を利用した磁性細線記録デバイスを実現するために、まず、垂直磁化膜を用いた磁性細線を作製することとした。垂直磁化膜は面内磁化膜に比べ磁壁幅が小さく磁壁駆動速度の向上が見込まれるとともに、高密度記録の際にも有利となる。本章では、[Co/Pd]垂直磁化膜の磁気特性とその作製方法を示すとともに、磁性細線に加工した際の磁気特性についても評価した。

3.1 [Co/Pd]垂直磁化膜の作製

[Co/Pd]多層垂直磁化膜は、膜厚が数Å～数10Åの非常に薄い磁性層(Co)と非磁性層(Pd)を基板上に周期的に堆積させたものである。磁性層と非磁性層単体とは異なる磁気特性を示し、膜全体として磁気特性を発揮するため、人工格子とも呼ばれている。また、青色の波長の領域で大きなKerr回転角を示すといった特徴があり、光磁気媒体としても注目されている。このような人工格子垂直磁化膜は磁性層と非磁性層の膜厚や周期を変化させることにより磁気特性を制御することが可能であるため、まず、[Co/Pd]多層膜を用いた垂直磁化磁性細線を作製し、細線中の磁区の電流駆動を検証することとした。

図3-1は作製した[Co/Pd]垂直磁化多層膜の膜構成と周期を変化させたときの、振動試料型磁力計(VSM)[17]により測定した垂直方向の磁気特性の変化を示したものである。磁性細線に加工した後、電流を印加した際に基板上に電流が流れることのないよう、表面熱酸化Si基板上に[Co/Pd]多層膜を堆積した。表面熱酸化層の厚さは300nmである。磁性層の下地層はTaとし、3nmの厚さとした。Co層1層あたりの膜厚は0.3nmとし、Pd層1層あたりの膜厚は1.2nmとした。29周期までは垂直磁気異方性を持つ薄膜となることを確認し、14周期と21周期では残留磁化状態で上向きの磁化状態と下向きの磁化状態が安定して取れることが確認できた。そこで、21周期の[Co/Pd]多層膜を用いて磁性細線に加工することとした。

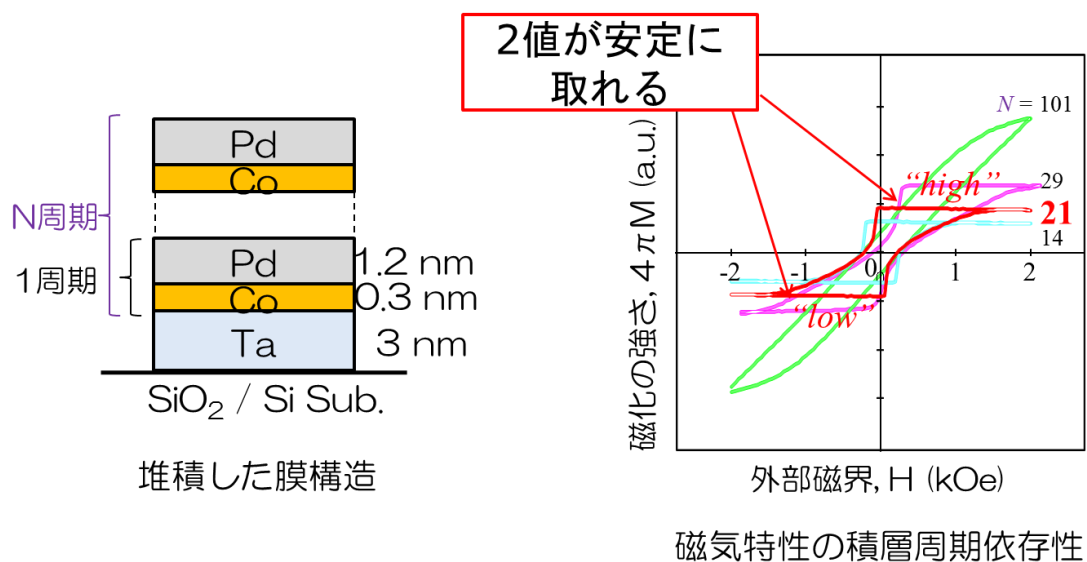


図 3-1 [Co/Pd]垂直磁化多層膜の膜構成と周期を変化させたときの磁気特性の変化

3.2 [Co/Pd]磁性細線の作製プロセス

[Co/Pd]磁性細線は2インチφの表面熱酸化Si基板の上に、電子線描画とリフトオフプロセスを用いて作製した。磁性細線へ電流を印加するための電極はフォトリソグラフィーにより作製した。磁性膜および電極膜の堆積にはイオンビームスパッタ法を用いた。人工格子膜のようなÅオーダーの薄膜を作製するためには、堆積膜の膜厚を精密に制御することができるイオンビームスパッタ法が有効である。

図3-2に磁性細線の作製プロセスを示す。最初に基板の上にレジストを塗布し、磁性細線のパターンを描画する。現像したのち、磁性膜を堆積させリフトオフを行い、磁性細線を形成する。この磁性細線の両端に合わせるような形でフォトリソグラフィーにより電極パターンを形成した。

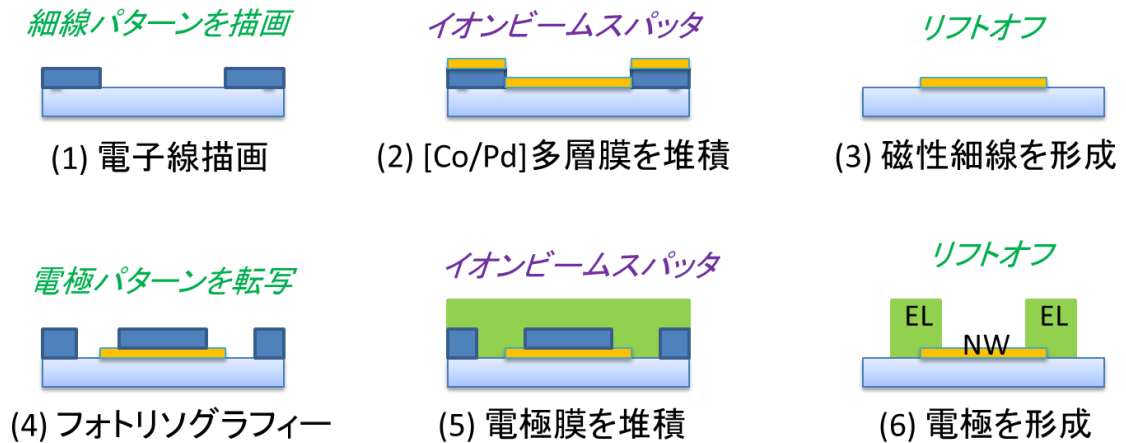


図3-2 [Co/Pd]垂直磁化磁性細線作製プロセスの模式図

3.3 [Co/Pd]磁性細線の構造

図3-3に作製した磁性細線の構造と光学顕微鏡像、原子間力顕微鏡像を示す。電極と電極との間に $20\mu\text{m}$ の長さの磁性細線を形成した。磁性細線の幅は 150nm とし、[Co/Pd]多層膜の周期は21周期のものを採用した。また、細線の両脇に $2\mu\text{m}$ の長さの磁区位置確認用のマーカーを作製した。これは原子間力顕微鏡等で磁区の位置を確認する際に移動の様子や距離を測定しやすくするためのものである。図3-4に磁性細線の原子間力顕微鏡による断面プロファイルの結果を示す。幅がおよそ 150nm 、高さが $35\text{--}40\text{nm}$ 程度であることがわかる。図3-5は作製した磁性細線の垂直磁気特性をMOKE(磁気光学カー効果)により測定した結果である。測定に利用したレーザーの波長は 408nm とした。細線加工後の保磁力はおよそ 1.5 kOe と薄膜で測定したときよりも大きな値となった。これは細線に加工した際の形状による磁気的な異方性の影響と考えられる。

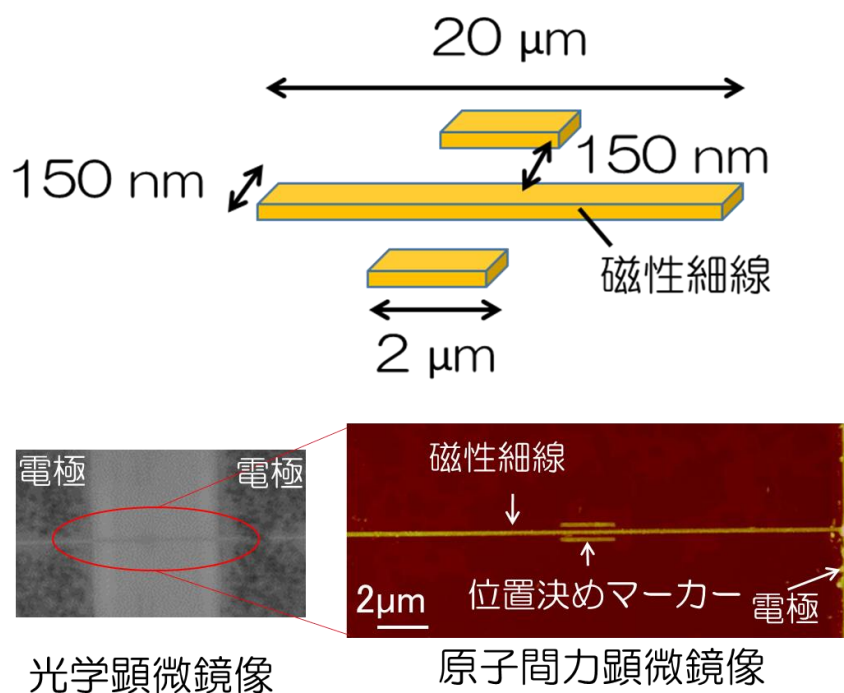


図3-3 作製した磁性細線の光学顕微鏡像と原子間力顕微鏡像

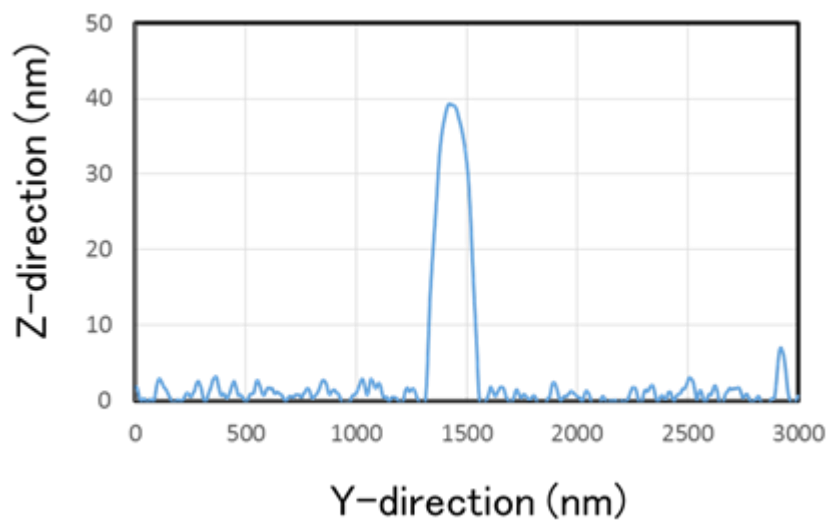


図 3-4 [Co/Pd]磁性細線の断面プロフィール

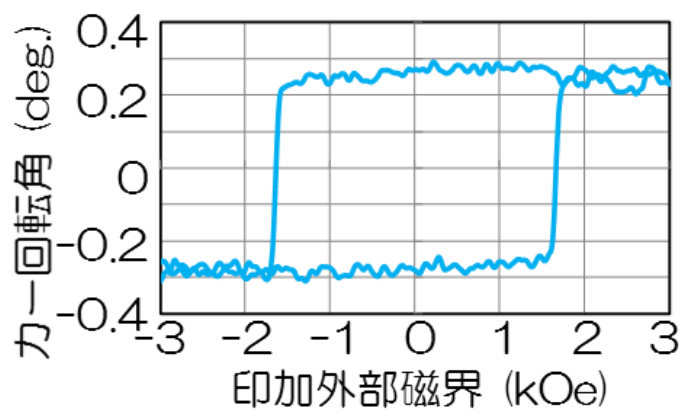


図 3-5 [Co/Pd]磁性細線の垂直磁気特性(MOKE 測定)

3.4 [Co/Pd]磁性細線の細線幅の最適化

図 3-6 に、磁気力顕微鏡によって測定した [Co/Pd] 垂直磁化磁性細線の細線幅に対する磁区構造の変化の様子を示す。磁気力顕微鏡像の明領域は上向きの磁区、暗領域は下向きの磁化を持つ磁区となっている。線幅 500 nm の細線では、渦状の複雑な磁化状態を示しており、記録媒体としては扱いにくい磁区・磁壁構造を持っていることがわかる。一方、線幅 250 nm 以下の細線では、磁化方向が異なる磁区が安定に整列しており、細線幅方向に単磁区である様子が観察できた。

後者の磁区構造は、ハードディスクドライブにおける一つのデータトラックを抜き出して直線状にしたものとみることもでき、磁気記録媒体として使用可能であることを示している。そのため、線幅 150 nm の細線において電流磁区駆動の検討を進めることとした。

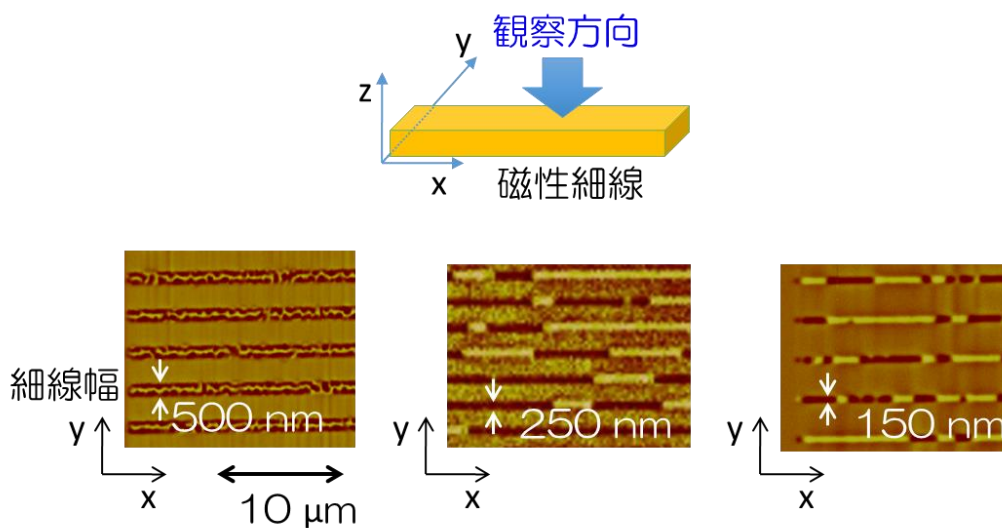


図 3-6 [Co/Pd]磁性細線の細線幅と磁化状態の変化

3.5 まとめ

磁性細線を用いた磁気記録デバイスの検証を行うため、まず[Co/Pd]人工格子多層膜を用いて磁性細線を作製することとした。[Co/Pd]多層膜では21周期以下の膜構造において良好な垂直磁気特性を示したため、この構造の多層膜を用いて磁性細線を作製した。細線に加工後は線幅250 nm以下の構造において細線幅方向に単一の磁区構造をとることが確認できたため、150 nmの線幅の[Co/Pd]磁性細線を用いて磁区駆動実験を行うこととした。

第4章 磁性細線における電流磁区駆動と検出技術

磁性細線を用いた記録デバイスの動作を実証するためには磁気力顕微鏡等を用いて電流印加前後の磁区の様子を観察するのではなく、電流を印加し移動している磁区を直接検出する必要がある。本章では磁気ヘッドを用いた駆動磁区の検出手法を構築するとともに、磁性細線中を電流駆動する磁区のリアルタイム検出に成功したのでその結果を示す。

4.1 電流駆動磁区の検出法

ここでは電流駆動する磁区の検出法として一般的に用いられる手法である異常ホール効果による磁区検出法 [22], [23] と磁気光学効果による磁区検出法 [24], [25] について紹介する。そして、本研究において採用した磁気ヘッドを用いた磁区検出法 [26], [27] の概要とその特長について紹介する。

4.1.1 異常ホール効果による駆動磁区検出法

ホール効果とは、磁場中で電流を流したときに電場と磁場に直交する方向に電荷の流れが生じる現象である [17]。強磁性体の場合、伝導電子などのキャリアが磁界中を動くことによって働くローレンツ力による正常ホール効果に加えて、スピンを持つキャリアがスピン軌道相互作用により非対称に散乱されることによって生じる異常ホール効果が発現する。異常ホール効果では図 4-1 に示すように電流と磁化に直交する方向に磁化に起因するホール電場 E_H が生じる。正常ホール効果は磁束密度の大きさに比例しており、低磁場では異常ホール効果に比べて小さい。異常ホール効果は磁化の大きさに比例するため、通常の磁化測定では検出できないような微小な磁性体や薄膜の測定に用いられる。

磁性細線における異常ホール効果を用いた磁区検出は図 4-2 に示すようなホールバーとよばれる電極を磁性細線に直交して形成することにより可能となる。ホールバーが直交している部分での磁化の向きの違いによりホールバーで検出される電圧 V_H が変化するため、磁区の磁化方向を測定することができる。磁区を検出できる位置はホールバーを形成した位置に固定されてしまうものの、測定試料

が薄いものであれば抵抗値が高くなるため測定しやすくなるという特長がある。

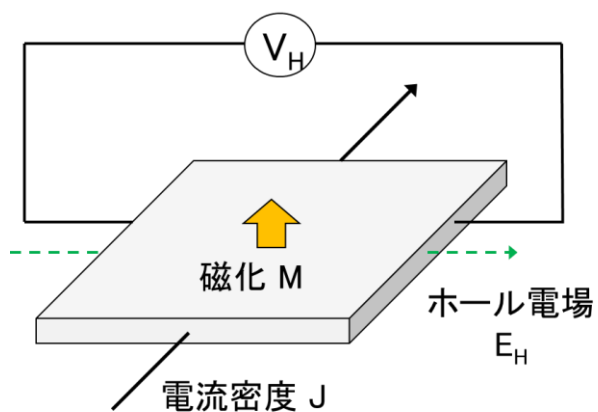


図 4-1 強磁性体に生じる異常ホール効果

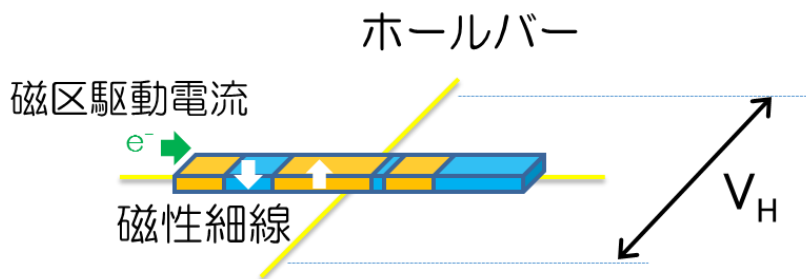


図 4-2 磁性細線における異常ホール効果を用いた電流駆動磁区検出法

4.1.2 磁気光学効果による駆動磁区検出法

測定する対象物が $1\ \mu\text{m}$ 以上の大きさであるならば磁気光学効果を用いた磁区の観察法も広く利用される手法である。磁性体に光を照射すると磁性体の磁化と電磁波の相互作用により透過光や反射光の強度が変化し偏光面が回転する。この現象を磁気光学効果とよぶ[28], [29]。この光の偏光面回転は磁化の向きや強度に依存するので、偏光の回転を観察することで磁区の磁化の向きを検出できる。偏光顕微鏡を利用することにより観察装置を構築することが可能で、測定対象物が金属磁性体の場合は、反射光を用いるカー効果顕微鏡法が効果的である。カー効果には入射光と磁性体の磁化方向の組み合わせが3つ存在し、極カー効果、縦カー効果、横カー効果とよばれる。磁性体の磁化方向が反射面法線と平行なときは極カー効果となり、垂直磁化膜の磁区構造を観察することが可能である。図4-3に示すような構成の偏光顕微鏡を用いた観察装置を準備できれば、測定試料を特に加工することなく極カー効果による磁区構造をリアルタイムに観察することができるといった特長がある。ただし、入射光の波長により測定できる磁区構造の分解能は制約される。解像限界 R は光の波長 λ と対物レンズの開口数 NA により、 $R=0.61\lambda/NA$ で与えられるため、開口数の大きな対物レンズと波長の短い紫外光を利用したとしても $100\ \text{nm}$ 程度の微細な磁区構造を観察することは難しい。

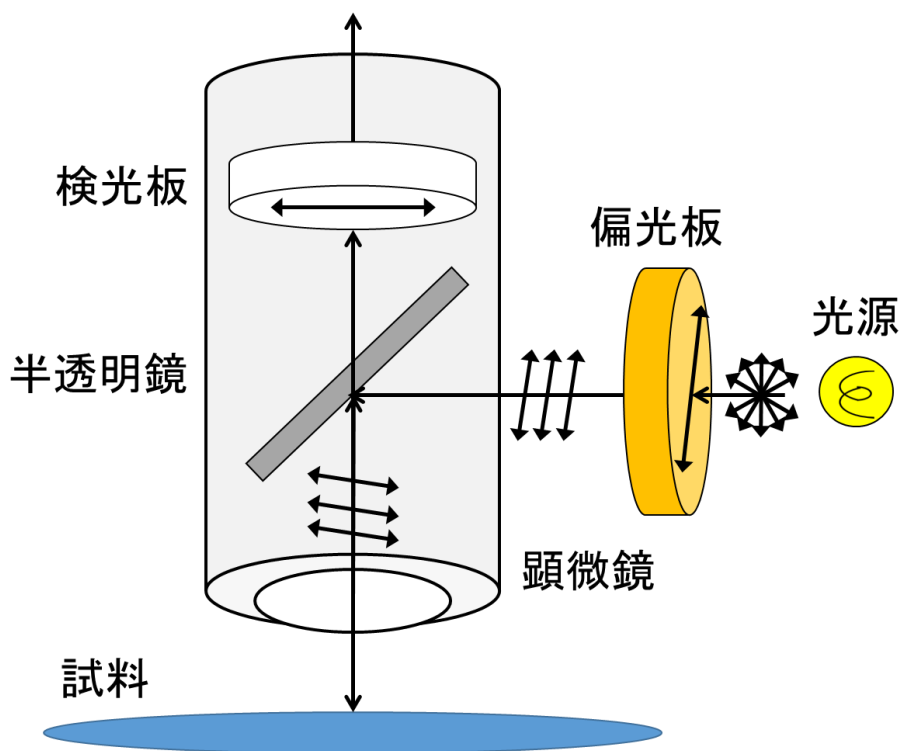


図 4-3 磁気光学効果を利用した磁区観察装置の模式図

4.1.3 磁気ヘッドによる駆動磁区検出法

そこで、本研究において磁区駆動を検出する手段として採用したのがハードディスクドライブに用いられる磁気ヘッドによる磁区検出法である。磁気ヘッドは測定対象媒体から発生する磁束を磁気ヘッド中の再生ヘッドにより直接検出するため、精密に試料に接触させることができれば、測定試料の任意の位置での磁化方向を検出することができる。分解能についてもハードディスクドライブの記録媒体に記録された磁区を検出することができるため、磁性細線中の磁区であれば十分に検出できると考えられる。

図4-4に磁気ヘッドへ外部磁場を印加したときの再生ヘッド抵抗値の変化を示す。再生ヘッドの抵抗値自体は各磁気ヘッドにより異なるが、印加した外部磁場の大きさとそのときの再生ヘッド抵抗値の関係がわかれば校正することができる。

図4-5は磁気ヘッドを用いた磁区観察装置の動作を示した模式図である。はじめに磁気ヘッドを測定試料に接触させ、サンプルステージを動かすことによって表面を走査する。測定位置は測定位置観察用顕微鏡を用いて調整し、磁気ヘッドと測定試料間の距離は側面の接触状態確認用顕微鏡によって確認する。側面の顕微鏡による映像は図4-6に示されるように観察され、磁気ヘッドが確実に試料に接触するように調整する。

図4-7に8本の磁性細線を並べた試料上を磁気ヘッドにより接触走査して得られた磁束密度分布像と、同領域を磁気力顕微鏡[29]により測定した結果を示す。磁気ヘッドによる磁束密度分布像では赤色の領域が上向き磁化の磁区、青色の領域が下向き磁化の磁区を表す。磁気力顕微鏡で示される磁区の磁化方向の向きは明領域が上向き磁区、暗領域が下向き磁区となるが、2つの測定法で全く同じ磁区構造を観察することができる。このことから磁気ヘッドによる測定においても確実に細線の磁区構造を解析できることが確認できた。磁気ヘッド中の再生ヘッドを通過する磁束の密度を抵抗値として出力することができるため、走査せず固定した状態でも再生ヘッド周辺の磁束の変化を出力できる。そのため、磁性細線中の任意の位置に固定することで細線中の磁区の移動を検出することが可能である。この磁気ヘッドを用いて磁性細線中を電流駆動する磁区を検出する装置を構築することとした。

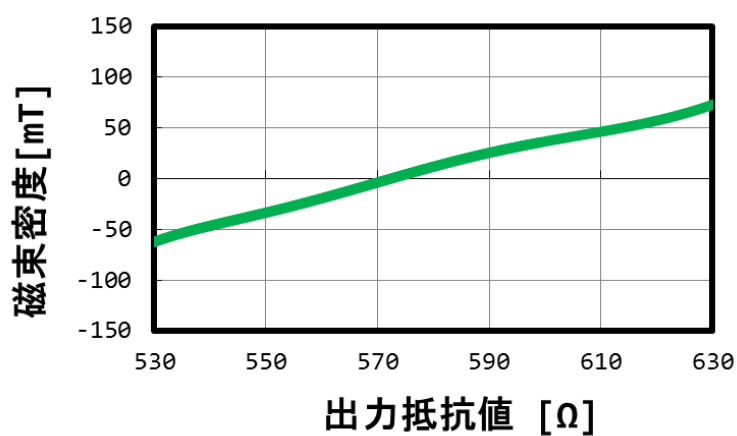


図 4-4 外部磁場印加時の再生ヘッド抵抗値の変化

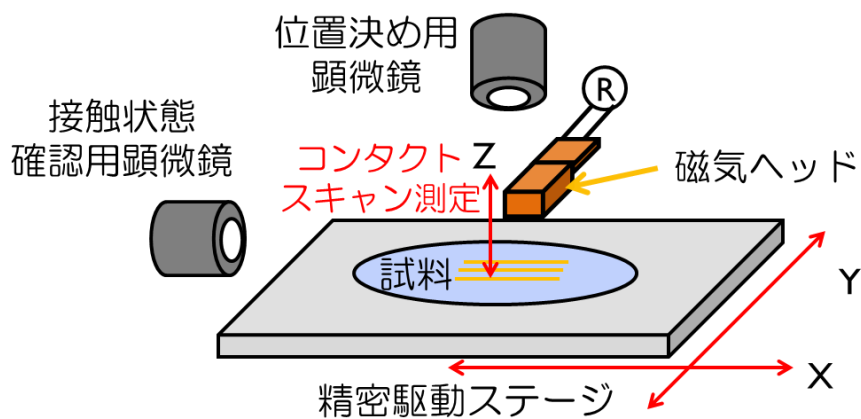


図 4-5 磁気ヘッドを用いた磁区観察装置の模式図

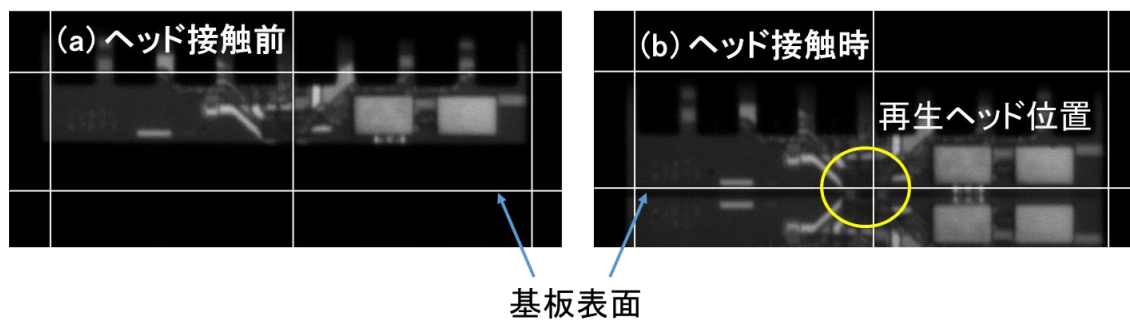


図 4-6 接触状態確認用顕微鏡から見た磁気ヘッド

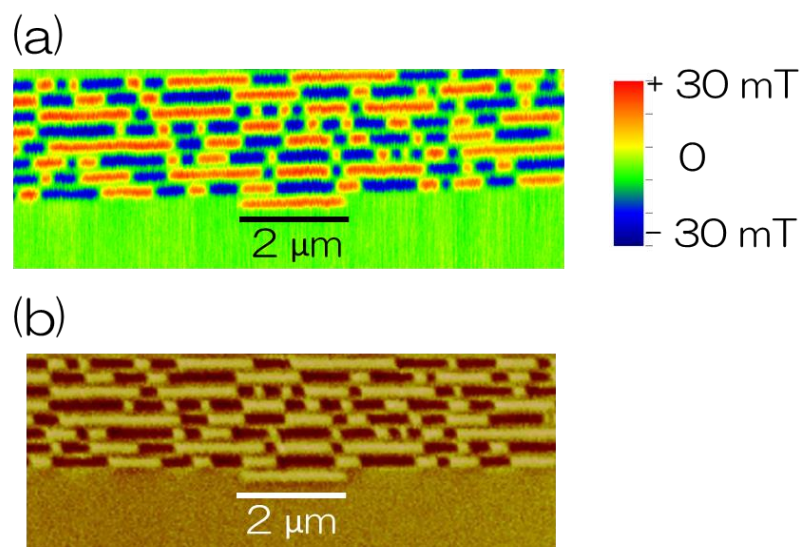


図 4-7 複数の [Co/Pd] 磁性細線中に形成された磁区構造の
(a) 磁気ヘッドによる磁束密度分布像と (b) 磁気力顕微鏡像

4.2 [Co/Pd]磁性細線における電流磁区駆動

作製した[Co/Pd]磁性細線における電流磁区駆動を確認するため、電流印加前後の細線中の磁区構造の変化を磁気力顕微鏡により観察した。図 4-8 に(a) 2.5×10^7 A/cm²、(b) 2.7×10^7 A/cm²、(c) 2.8×10^7 A/cm²の電流密度のパルス電流を $5 \mu\text{s}$ 印加したときの磁区構造の変化を示す。 2.5×10^7 A/cm²以下の電流密度の電流を印加した際は、磁区構造の変化は観察されなかったが、 2.7×10^7 A/cm²の電流密度の電流を印加したときに、電子の流れる方向へ細線中の磁区がそれぞれ約 150 nm 移動したことが確認できた。電子の流れる方向に磁区駆動が観察できたことから、スピントランスファートルクによる磁区の移動と考えられる。続いて、 2.8×10^7 A/cm²以上の電流密度の電流を印加すると磁区構造が大きく変化し、多磁区化する様子が観察された。これは電流を印加したことによるジュール熱により、磁区構造がランダムに変化したものと推測される。不要なジュール熱の発生を抑えるため、500 ns のパルス幅の電流を印加することでの磁区構造の変化を観察した結果が図 4-9 である。(a) 2.5×10^7 A/cm²の電流密度のパルス電流を印加したときには磁区構造は変化せず、(b) 2.7×10^7 A/cm²、(c) 2.8×10^7 A/cm²の電流密度を持つパルス電流を印加したときに電子の流れる方向への磁区の移動が確認できた。(d) 3.0×10^7 A/cm²の電流密度のパルス電流印加後には細線中の磁区が多磁区化が観察されたことから、印加電流のパルス幅を短くすることによりジュール熱の発生が抑えられ、磁区駆動を確認できる電流密度の幅が広がったことがわかる。

図 4-10 は印加した $5 \mu\text{s}$ と 500 ns のパルス幅の電流を印加した際の電流密度と磁区駆動距離との関係を示したものである。ここでは多磁区化してしまったときの磁区駆動距離を 0 nm として示した。これらの結果から[Co/Pd]磁性細線における磁区駆動に必要なしきい電流密度は 2.6×10^7 A/cm² であると確認できる。また、印加した電流のパルス幅と磁区駆動距離から、磁区の電流駆動速度は最大でも 0.3 m/s と見積もられる。わずかな印加電流密度の違いで、電流印加後の磁区構造の変化が大きく異なったことから、500 ns- $5 \mu\text{s}$ のパルス幅の電流による磁区駆動においては熱の影響を大きく受けていると考えられ、次項の磁気ヘッドによる磁壁駆動の検出の際には、さらに短いパルス幅の電流を印加することによる磁区駆動を検証することとした。

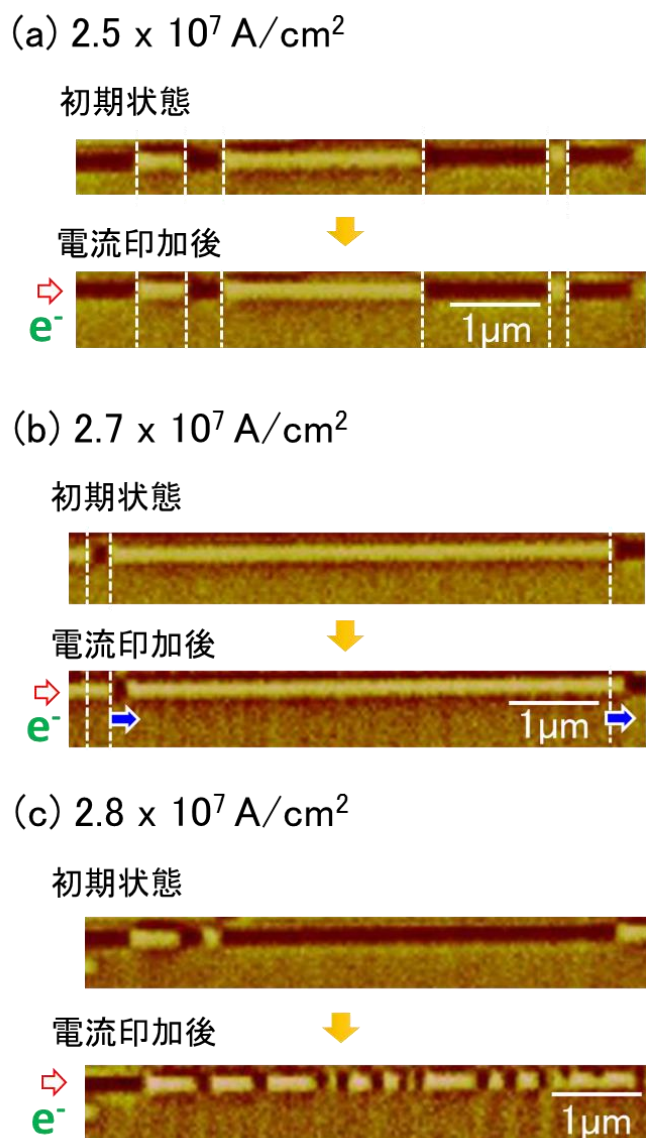


図4-8 (a) $2.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、(b) $2.7 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、(c) $2.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度のパルス電流を $5 \mu\text{s}$ 印加したときの磁区構造の変化を観察した磁気力顕微鏡像

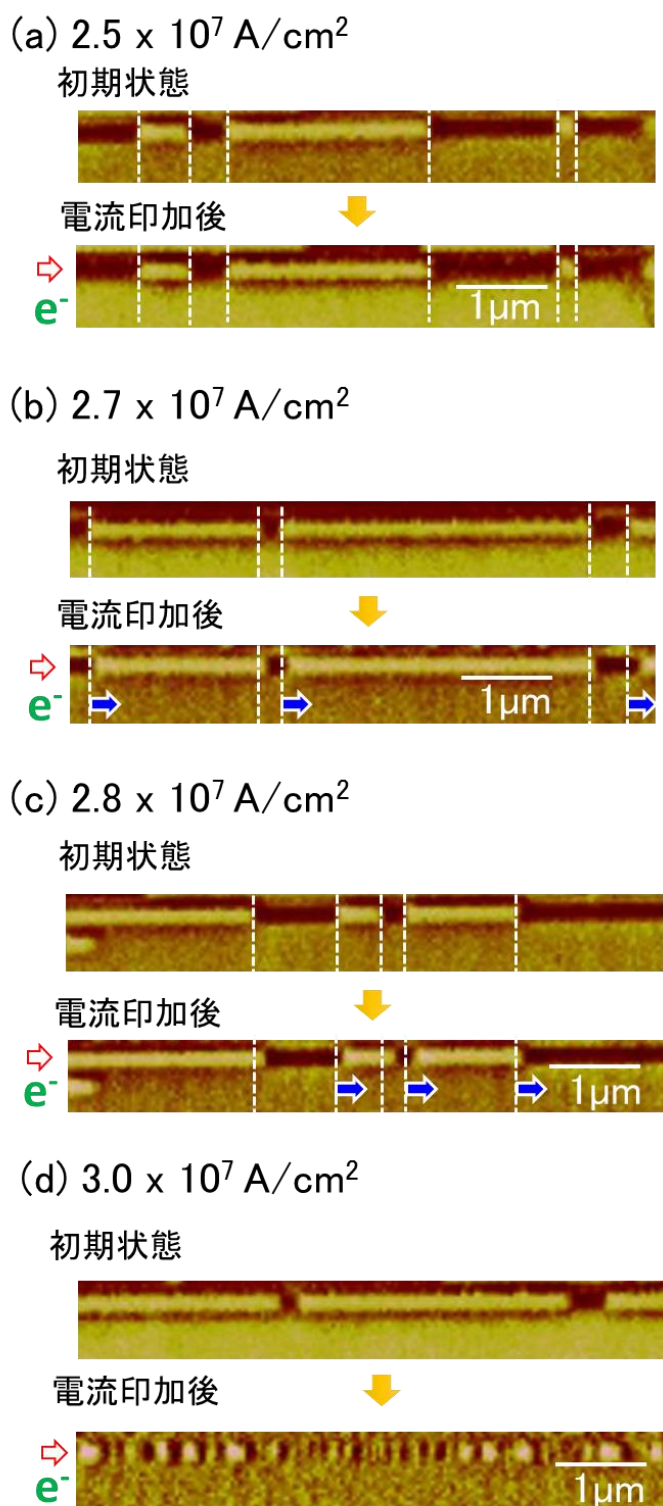


図 4-9 (a) $2.5 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、(b) $2.7 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、(c) $2.8 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、(d) $3.0 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度のパルス電流を 500 ns 印加したときの磁区構造の変化を観察した磁気力顕微鏡像

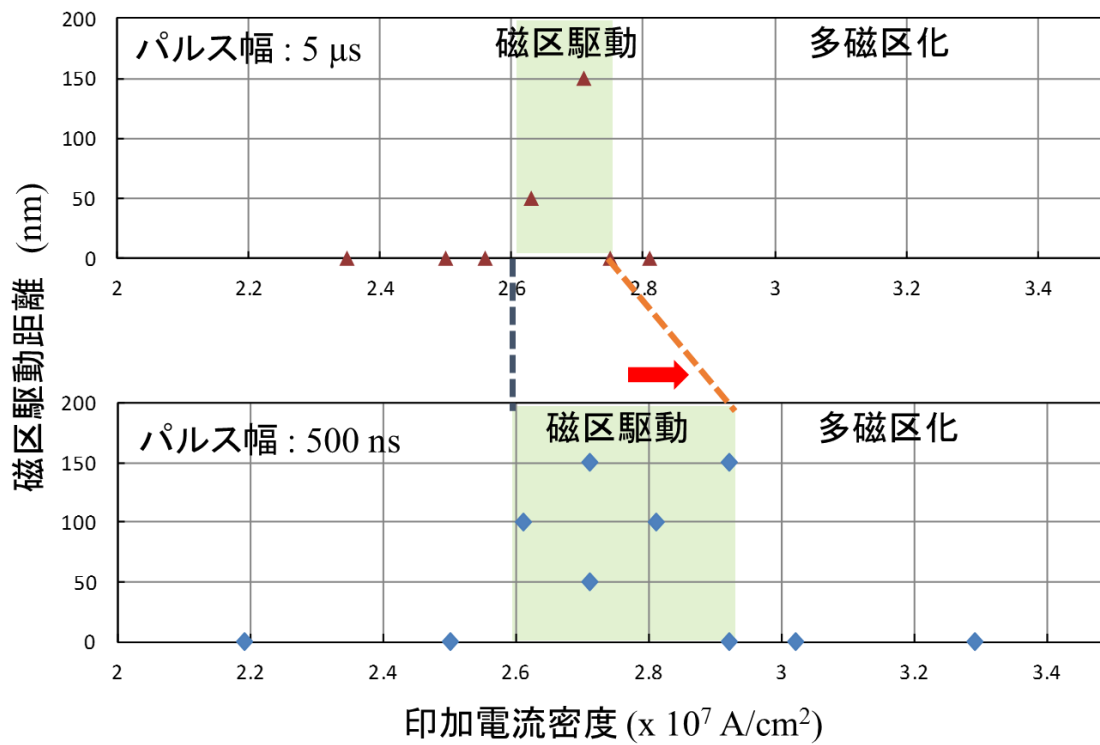


図 4-10 パルス幅および印加電流密度を変化させたときの磁区駆動距離の分布

4.3 磁気ヘッドを用いた電流磁区駆動検出実験

図 4-11 に磁気ヘッドを用いた磁区駆動検出実験の模式図を示す。電流駆動した磁区の磁化方向は磁性細線上に固定された磁気ヘッド中の再生ヘッドにより検出される。磁性細線中の磁区は次の手順で導入した。まず、4 kOe の下向きの外部磁界を印加した後、実験に用いた [Co/Pd] 磁性細線の保磁力とほぼ同じ 1.6 kOe の上向きの外部磁界を印加した。その結果およそ半分の領域にわたって上向きの磁化を持つ磁区がランダムに導入された。

まず、磁性細線にパルス電流を印加することにより、細線中の磁区構造がどのように変化するのか確認した。電流を印加する前の磁区構造を磁気ヘッドにより走査し観察した後、パルス幅 50 ns、電流密度 6.3×10^7 A/cm² のパルス電流を 5 回、磁性細線に印加した。図 4-12 はそれぞれ (a) パルス電流印加前の磁性細線の磁区構造、(b) 右から左へパルス電流を印加した後の磁性細線の磁区構造、(c) さらに左から右へパルス電流を印加した後の磁性細線の磁区構造を観察した磁束密度分布像である。中心付近の赤い領域で示された上向き磁化を持つ磁区に注目すると、電流の流れる方向と逆方向に約 250–500 nm 移動しているのが確認できる。印加した電流のパルス幅から磁区の移動速度はおよそ 1–2 m/s と見積もられ、500 ns 以上のパルス幅の電流により磁区駆動したときに比べ、磁区駆動に必要な電流密度は上昇したものの、高速に磁区を動かすことができていることを確認できた。ただし、1つの磁壁が位置確認用のマーカーに挟まれた領域で動かなくなり留まってしまっており、隣接するマーカーからの漏れ磁界により磁壁を動きにくくするような磁区トラップサイトが形成されてしまったのではないかと推測される。

続いてこの磁区が動いた部分に再生ヘッドを固定してその出力の変化を観察することで磁区駆動を検出する。図 4-13 はパルス幅 50 ns、電流密度 6.6×10^7 A/cm² のパルス電流を 2 秒おきに (a) 右から左へ (b) その後左から右へ印加し続けたときの再生ヘッド出力の時間変化である。図 4-13 (a) で示されるようにパルス電流が印加されるごとに再生ヘッド出力が変化し、ヘッド直下の磁区が上向きから下向きへ変化している様子がわかる。4 回のパルス電流印加により完全に上向きから下向きへ変化し、磁壁部分が再生ヘッド直下を通過する様子が検出できた。図

4-13(b)においては3回のパルス電流印加によりヘッド直下の磁化方向が下向きから上向きに変化する様子が観察できている。この結果から、電流駆動する磁区のリアルタイムでの検出に成功した。磁区の駆動速度を考えると、再生ヘッドの大きさがおよそ30 nmであることから、1回のパルス電流印加によって10-20 nm程度磁区が動いたと考えられる。これを速度に換算すると、およそ0.2-0.4 m/sの磁区駆動速度となり、ヘッドを細線上に固定しなかったときと比較すると大きく駆動速度が遅くなっていることになる。隣接細線からの漏れ磁束の影響を受けると同様に、磁気ヘッドのシールドなどからの漏れ磁束により磁区の駆動速度が影響を受けていることが原因だと考えられる。

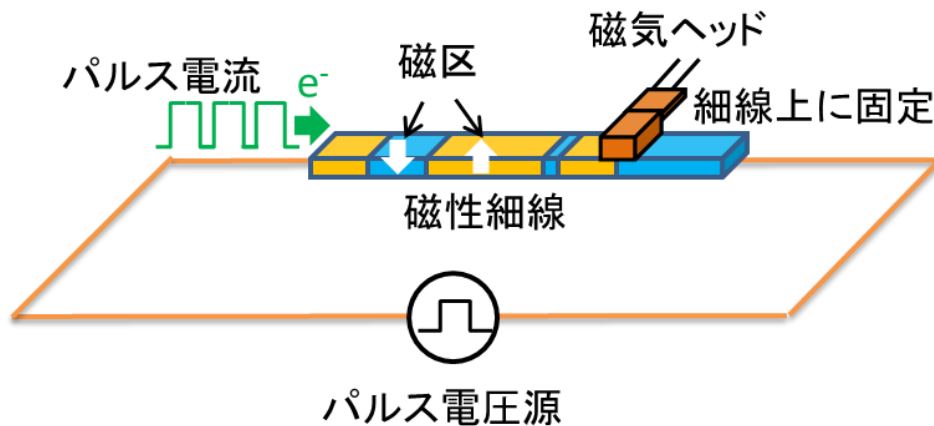


図 4-11 磁区駆動検出実験の模式図

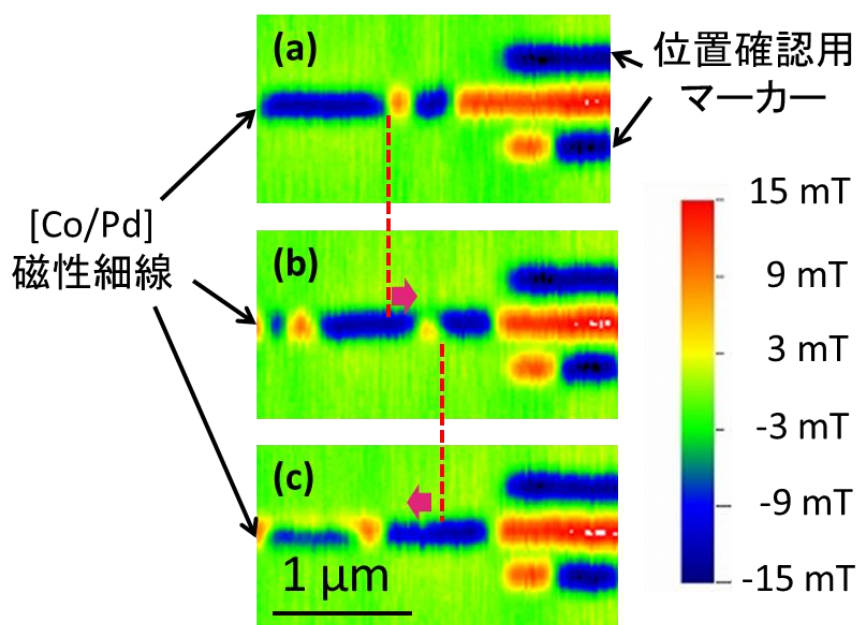


図 4-12 (a)パルス電流印加前、(b)右から左へパルス電流印加後、
(c)左から右へパルス電流を印加後の磁性細線の磁区構造

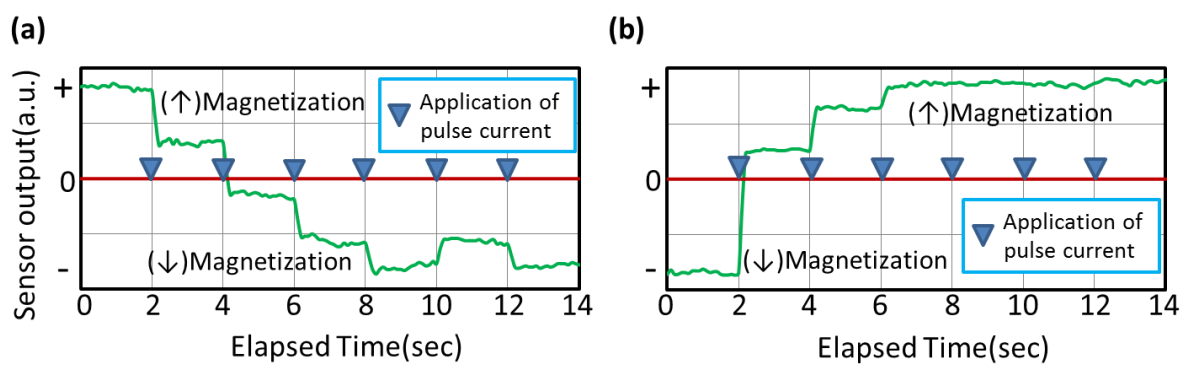


図 4-13 (a) 右から左へ (b) 左から右へのパルス電流印加に伴う再生ヘッド出力の時間変化

4.4 まとめ

磁気ヘッドを用いた駆動磁区観察装置を構築し、磁性細線に接触させた再生ヘッドの抵抗値の変化により、磁性細線中を電流駆動する磁区をリアルタイムに検出することとした。まず、[Co/Pd]磁性細線における電流磁区駆動を観察し、パルス電流の印加によって、磁区が電子の流れる方向に移動することを確認した。この結果からスピントランスファートルクによる電流磁壁駆動により、磁区が移動したと考えられる。続いて駆動した磁区の周辺に再生ヘッドを固定し、その抵抗値の変化を観察することで駆動磁区の検出が可能か検証した。細線長さ方向へのパルス電流の印加に伴い、電子の流れる方向に移動する磁壁を検出したことにより、再生ヘッドを用いた駆動磁区の検出を実証した。[Co/Pd]磁性細線における磁区駆動は熱による多磁区化が観察される電流密度よりもわずかに低い電流密度で観察されており、磁区の駆動開始には熱によるエネルギーが大きく影響を与えていると考えられる。ただし、パルス幅を短くすることで磁区の移動速度は上昇することから、細線の温度上昇が磁区駆動速度低下の要因にもなっていると推測される。例えば、細線材料のスピン偏極率は磁壁駆動速度に大きく影響を与えられていると考えられており、温度上昇によりこのスピン偏極率は低下する。このことが磁区の駆動速度を減少させる要因の一つになっているのではないかと考えられる。

第5章 磁気ヘッドによる磁性細線への磁区形成

第4章において、外部磁場印加後にランダムに形成された磁区を電流駆動し、再生ヘッドによる検出を実証した。本章では記録ヘッドを用いて磁性細線へ磁区を形成できる条件を検討した。

5.1 記録ヘッドによる磁区形成検証実験の手順

図5-1は磁性細線への磁区形成検証実験の手順を示した模式図である。実験を効率よく進めるため、1本の細線のみならず、8本並んだ細線を横断するように磁気ヘッドを走査し、磁区形成条件を検証することとした。初めに磁性細線中の磁区の磁化方向を外部磁界により下向きへ揃えた後、細線表面を磁気ヘッドにより走査しながら、記録ヘッドへ電流を印加することにより磁性細線へ上向き磁化をもつ磁区を導入する方向の磁場を印加する。再生ヘッドと記録ヘッドの位置は $4.5\mu\text{m}$ 離れているため、記録ヘッドにより磁性細線表面を走査した後、走査する位置を $4.5\mu\text{m}$ 動かして、再生ヘッドにより磁性細線表面を走査することで磁区が形成されているのか検証した。

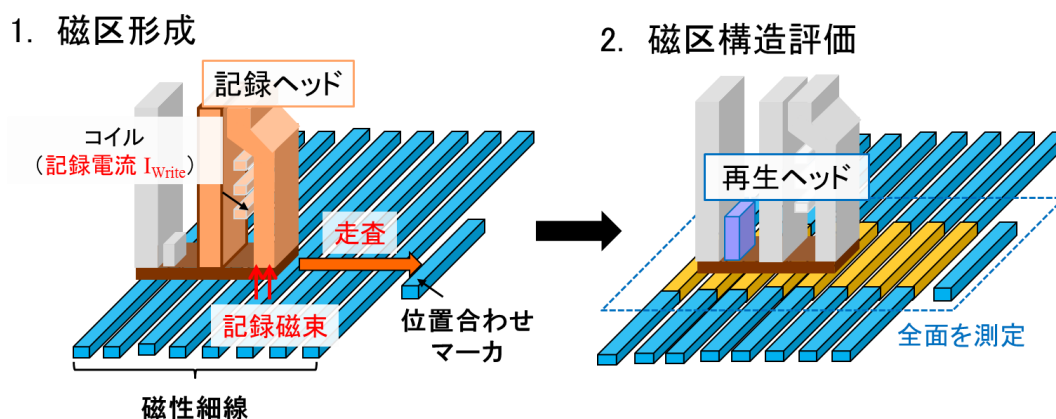


図5-1 磁区形成検証実験の手順

5.2 磁区形成実験結果

図 5-2 に記録ヘッドへ記録電流 (31 mA, 84 mA) を印加して磁性細線表面を走査した後の磁性細線の磁区構造を再生ヘッドにより観察した結果を示す。磁性細線の色は青色から変化がなく、下向きの磁化を持つ磁区から変化していない様子が確認できる。84 mA もの電流を記録ヘッドに印加しても磁性細線へ磁区を導入することができなかったことから、磁気ヘッドから発生した磁束が磁性細線中を十分に通過せず磁化方向を反転することができなかったことがわかる。

磁束が細線中を十分に通過しなかった原因として磁気ヘッドを十分に細線に近接できなかったことが考えられる。細線両端には電極が付与されており、電極高と細線の高さの差は約 30 nm である。また、磁気ヘッド表面にはヘッドを保護するための DLC 保護膜が取り付けられており、この厚さも 30 nm となっている。すなわち磁性細線と記録ヘッド間の距離は 60 nm 程度離れてしまっていることになる。

この距離は現状のハードディスクドライブのヘッドー記録媒体間距離 (数 nm) と比較しても非常に大きい。そこで、磁性細線に磁気ヘッドを近接させるために図 5-3 に示すような 2 層構造の電極を形成し、細線周辺の電極の高さを下げることによって記録ヘッドを磁性細線に近接させることとした。また、DLC 保護膜の薄い (1 nm, 10 nm) 磁気ヘッドを用いて記録が可能であるか検証した。このとき形成された磁区の様子を図 5-4 に示す。図 5-4 (a) は 10 nm の DLC 保護膜、(b) は 1 nm の DLC 保護膜を持つ磁気ヘッドを用いて磁区形成を行った結果である。記録電流が大きくなると走査した領域において上向き磁化を持つ磁区の範囲が広がっていることが分かる。図 5-5 にヘッドー細線間距離 (SP) を変化させたときの磁区形成確率の記録電流依存性を示した。ヘッドー細線間距離を 1 nm とすることで確実に磁区が形成できることがわかった。

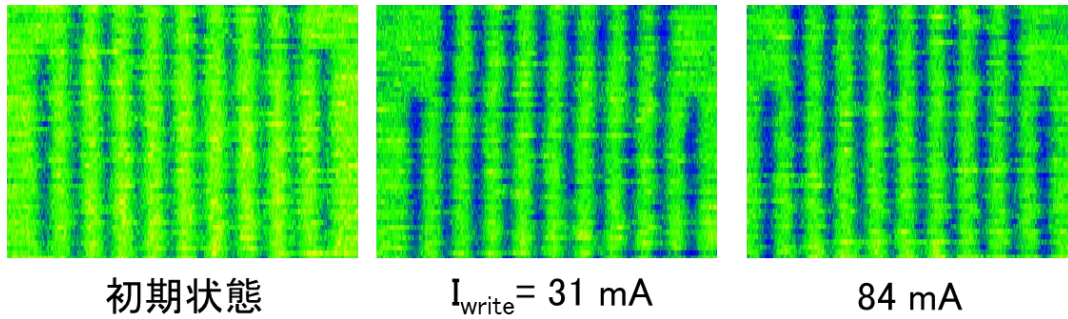


図 5-2 記録ヘッドへの記録電流印加後の磁性細線の磁区構造

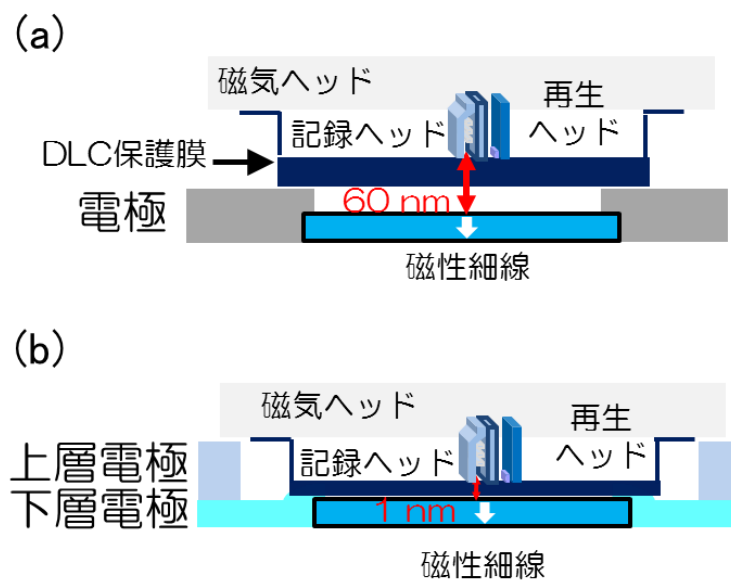


図 5-3 (a)従来の電極構造と (b)2層電極構造

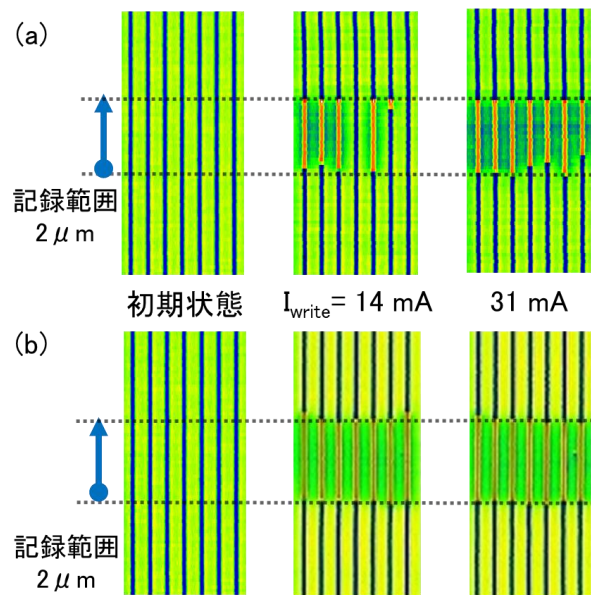


図 5-4 (a)10 nm の DLC 保護膜、(b)1 nm の DLC 保護膜を持つ
磁気ヘッドを用いて形成された磁区

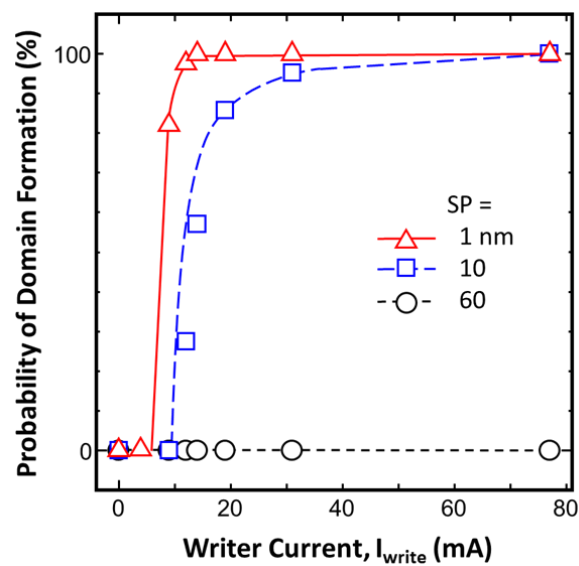


図 5-5 ヘッド-細線間距離 (SP) を変化させたときの
磁区形成確率の記録電流依存性

次に細線上に磁気ヘッドを固定した状態で、磁区を形成した結果が図 5-6 である。再生ヘッドを固定した位置から $4.5\ \mu\text{m}$ 離れた位置に記録ヘッドにより形成された磁区を確認することができた。この距離は磁気ヘッド上の再生ヘッドー記録ヘッド間の距離と一致する。この磁区の長さは約 $100\ \text{nm}$ であり、記録ヘッドの大きさ $40\ \text{nm}$ と比べて広がるような形で磁区が形成されることがわかった。

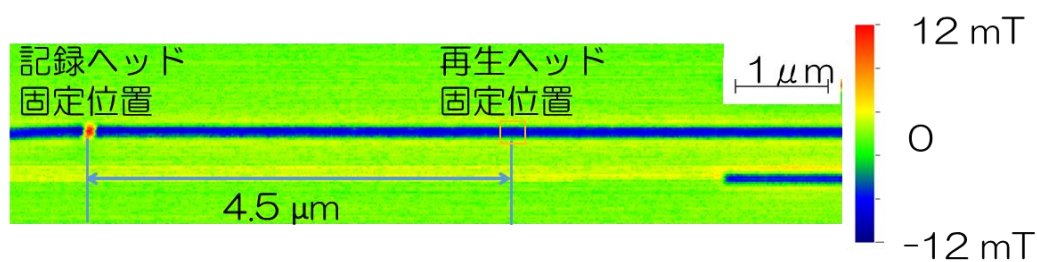


図 5-6 磁気ヘッドを細線上に固定した状態で形成した磁区

5.3 まとめ

磁気ヘッドにより磁性細線へ磁区形成できる条件を検証するため、記録ヘッドに電流を印加しながら、磁性細線上を走査することで磁区を磁性細線へ導入することとした。このとき、電極上にヘッド先端の ABS 面が乗ってしまうことで、磁性細線と記録ヘッド間のギャップが約 60 nm と非常に大きくなり、記録ヘッドからの磁束が磁性細線へ十分に届かず磁区を形成することができないことがわかった。そこで、電極構造を 2 層とし、細線周辺の電極の高さを低くすることで、記録ヘッドを細線に近接させることを可能とした。ヘッドの DLC 保護膜を 1 nm とし、磁性細線と記録ヘッド間のギャップをさらに 1 nm に近づけることで、14 mA 以上の記録電流により磁区がほぼ確実に形成できることが確認できた。

続いて、磁気ヘッドを磁性細線上に固定した状態で記録電流を印加することにより磁区形成を行ったところ、形成された磁区の大きさは細線長さ方向におよそ 100 nm となり、記録ヘッドの大きさに比べて広がって磁区が形成されることがわかった。これはこの磁性細線が幅方向に複数磁区をとるよりも、単磁区となった方が静磁エネルギーが小さくなり、安定するからだと考えられる。

第6章 磁性細線への磁区の記録・駆動・再生

第4章では垂直磁化磁性細線中における駆動磁区の再生ヘッドを用いたリアルタイム検出、第5章では記録ヘッドを用いた磁性細線中への磁区形成について検証してきた。本章ではそれら2つの技術を組み合わせ、磁気ヘッドを用いた磁性細線への磁区の形成（記録）、電流駆動、検出（再生）が一連の動作で可能となることを実証する。

6.1 磁区記録・駆動・再生実験における測定装置の構成

図6-1に構築した磁性細線への磁区記録・駆動・再生実験装置のブロック図を示す。第4章での磁区駆動検出実験の装置に記録ヘッドへ電流を印加するための任意波形発生器を増設した構成となっている。磁区駆動のために磁性細線へパルス電流を印加するパルス電源と増設した任意波形発生装置はトリガー信号によって同期して動作できるように設定し、さらにその信号が出力されると同時に再生ヘッド出力を記録再生制御PC上に保存できるようにした。磁性細線への磁区形成と駆動磁区の検出を同時に可能とするため、磁気ヘッド中の記録ヘッドと再生ヘッドがどちらも磁性細線上に存在するようにサンプルステージを位置調整し、固定することにより仮想的な磁性細線記録素子を構築することとした。

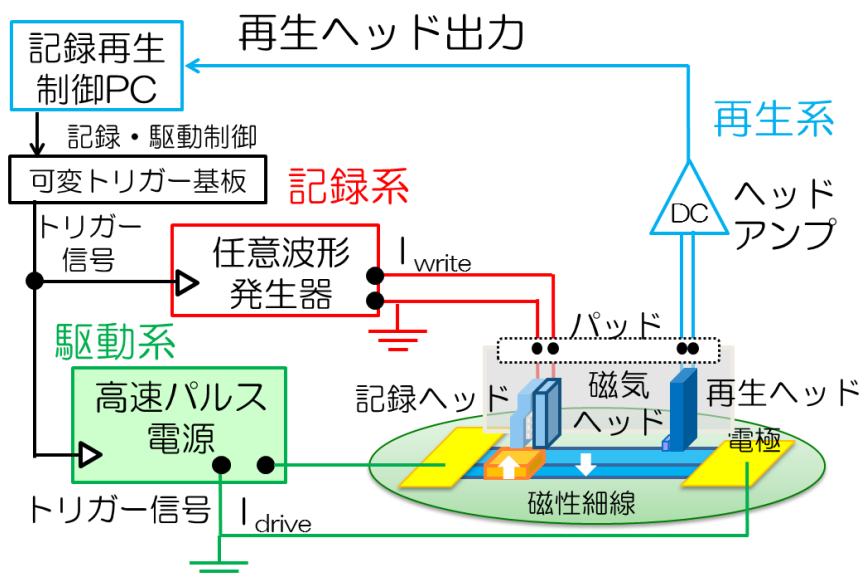


図 6-1 磁区記録・駆動・再生実験装置のブロック図

6.2 [Co/Pd]垂直磁化磁性細線における磁区の記録・駆動・再生実験

この記録・駆動・再生実験装置を用いて[Co/Pd]垂直磁化磁性細線へ磁区を記録しながら電流を印加し、再生ヘッドの出力信号の変化を測定した。磁性細線はあらかじめ細線全体の磁化方向が下向きとなるように外部磁場を印加した後、サンプルステージに設置した。記録ヘッドには2秒に1回、100 msの間40 mAのパルス電流を印加し、上向き磁区を形成するための磁界を発生させた。同時に磁区駆動のため、細線の長さ方向に電流密度 1.1×10^8 A/cm² で、1 msに1回、4.5 nsのパルス電流を連続的に印加した。このときの再生ヘッド出力、すなわち再生ヘッド直下の磁性細線から発生する漏えい磁束密度の変化を図6-2に示す。記録電流および駆動電流を印加し始めてから約8.7秒後にはじめて上向き磁区が再生ヘッド位置を通過する様子が検出され、その後、数回にわたり上向き磁区の信号を検出することができた。上向き磁区の検出された時間は、どの信号においても約100 msであり、記録ヘッドに印加した電流の時間と一致したことから、記録ヘッドにより形成した磁区が電流により再生ヘッド位置まで移動し、検出できたものと考えられる。以上の結果から1本の細線において磁気ヘッドを用いて磁区を形成（記録）し、その磁区を電流駆動して検出（再生）できることが実証できた。

しかし、本来は2秒に1回形成した上向き磁区は数秒に1回しか検出できず、再生ヘッドによる信号が欠落している部分が見られた。この理由としては、2つの原因が考えられる。1つ目は電流による移動途中で磁壁同士が接触することにより形成した磁区が消滅してしまった場合、2つ目は初めから磁区が形成できていなかった場合である。ここで、今回検出された上向き磁区の通過時間はすべて約100 msだったことから、磁区が形成できていなかった可能性が高いと考えた。そこで磁気ヘッドを細線上に配置するためのサンプルステージの熱ドリフトによる経時変化を調べた。図6-3にサンプルステージ上の磁性細線の位置が1時間の間にどれだけ変化しているか観察した写真を示す。図6-3(a)は観察開始時の磁性細線周辺の写真、(b)は1時間後の同位置での写真である。1時間の間におよそ10 μ m移動していることから1秒あたりだと2-3 nm移動していることとなり、無視することのできない大きさであることがわかった。記録ヘッドが細線の中心からずれることによる磁区形成への影響を調べるため、図6-4のように故意に記録ヘ

ヘッドを細線の幅方向にずらした位置に置き、そのずらした距離と磁区形成に必要な記録電流の関係調べた。このずらした距離 $D_{h.p.}$ と磁化反転に必要な記録電流の関係を図 6-5 に示す。原点となる細線の中心から 20 nm ほど記録ヘッドが離れた位置までは 8 mA 程度の記録電流で磁区が形成できているが、記録ヘッドが外側へずれていくに従い磁化反転に必要な記録電流は大きく上昇することが確認できた。図 5-6 で検出している磁束密度分布像ではおよそ ± 12 mT の磁束密度が再生ヘッドで検出されているのに対し、図 6-2 で検出されている信号はおよそ ± 4 mT となっており、これは磁束密度の分布から再生ヘッドの位置を見積もるとおよそ 50 nm 程度細線の中心から離れた状態であったと考えられる。このことから印加した 40 mA の記録電流では十分に磁区形成ができない状態であったと推測される。

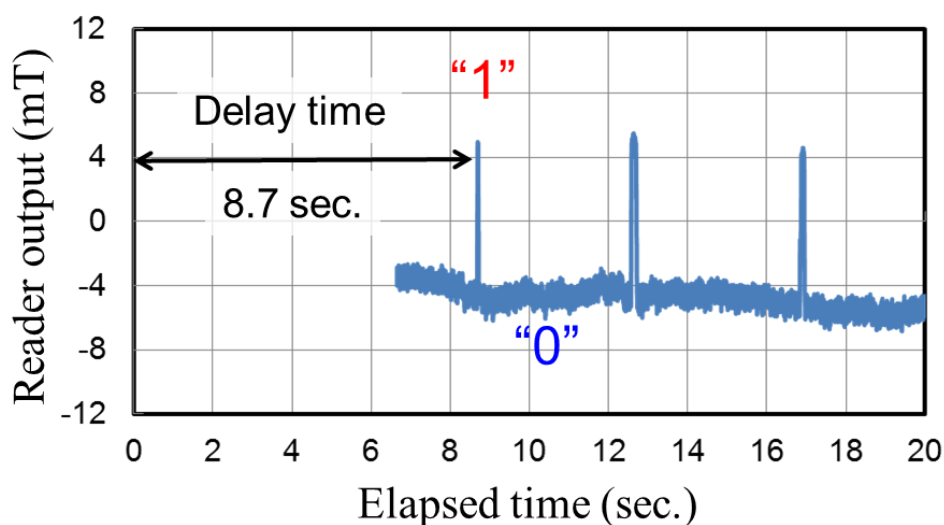


図 6-2 磁区記録・駆動・再生実験における再生ヘッド出力の時間変化

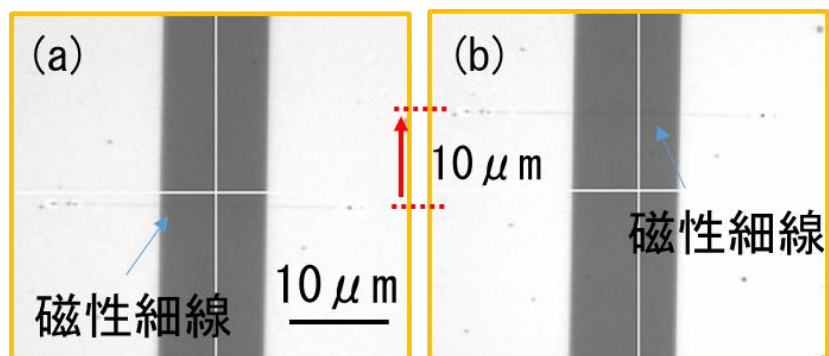


図 6-3 熱ドリフトによるサンプルステージの移動の様子を観察した光学顕微鏡像

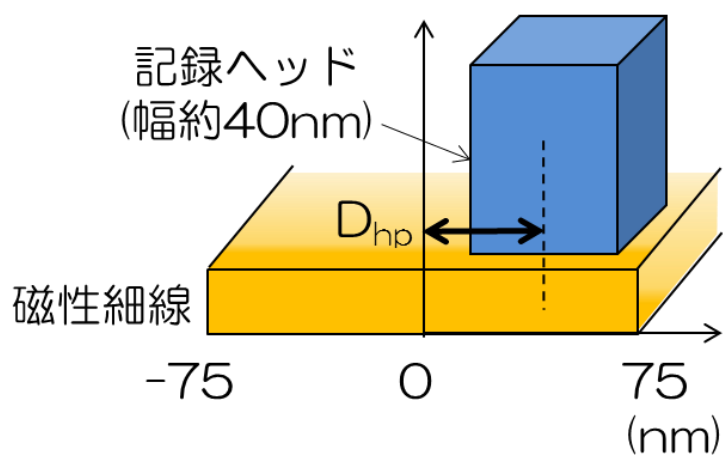


図 6-4 磁区記録検証実験における記録ヘッドと磁性細線の位置関係

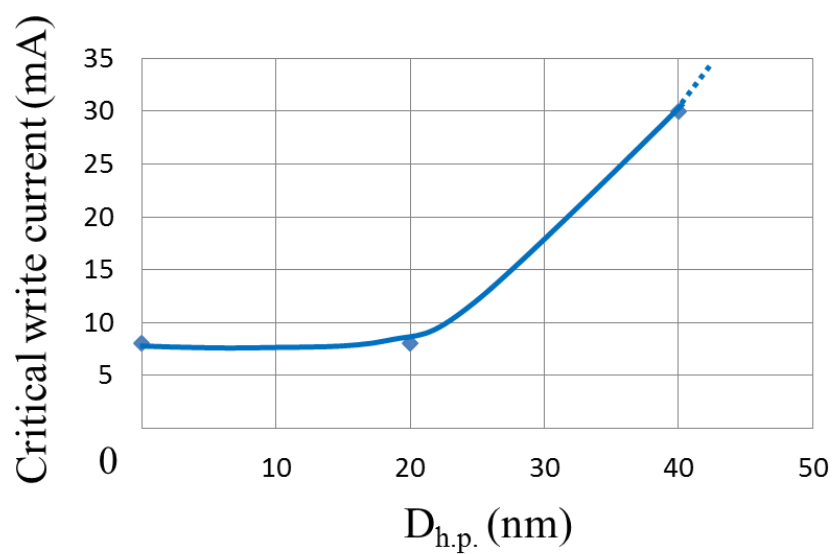


図 6-5 細線中心と記録ヘッドの中心部分との相対距離 $D_{h.p.}$ と磁区形成に必要なしきい記録ヘッド電流の関係

6.3 軟磁性下地層(SUL)を持つ磁性細線の作製と磁区形成条件の検証

熱ドリフトによるステージ位置ずれ制御は困難であるため、垂直磁気記録ハードディスクドライブの記録媒体に用いられる高透磁率軟磁性下地層(SUL)と同様な構造を磁性細線の下地層として付与し、その効果を検証することとした。垂直磁気記録媒体においてはSULを形成することにより、記録ヘッドーSULーリターンヨークの間に閉磁路が形成されヘッド磁界強度が向上するといった特長がある。SULには低保磁力、高透磁率といった磁気特性が求められるため、SUL材料として一般的なNiFe合金薄膜とスーパーマロイともよばれるNiFeMo合金薄膜をスパッタにより製膜し、その面内磁気特性をVSMにより測定した。図6-6にそれぞれの薄膜の磁気特性を示す。NiFe合金薄膜は保磁力12 Oe、NiFeMo合金薄膜は保磁力0.03 Oeと非常に小さな保磁力を持つ薄膜を得ることができた。

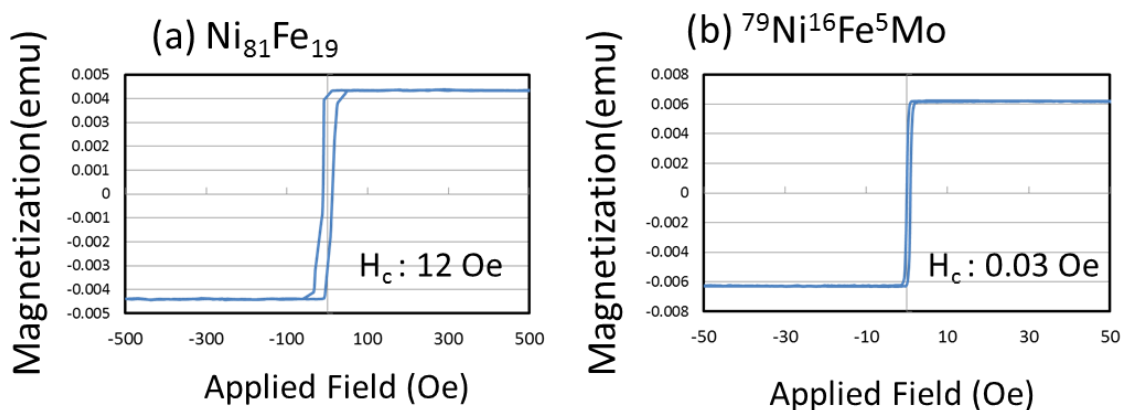


図6-6 VSMにより測定した(a)NiFe合金薄膜と(b)NiFeMo合金薄膜の面内磁気特性

続いてこれらの軟磁性材料を下地層として図 6-7 に示す構造の磁性細線を作製した。このとき SUL の層厚は 30 nm とした。この磁性細線において、図 6-4 で示したように記録ヘッドを細線の中心から幅方向に $D_{h.p.}$ の距離ずらした位置に置き、その距離 $D_{h.p.}$ と磁区形成に必要なしきい記録電流の関係を示したものが図 6-8 である。この結果から SUL を付与した細線では中心から 70 nm 離れた位置においても中心部分とほぼ同様の記録電流で磁区形成が可能であることがわかった。NiFeMo を SUL としたときには 70 nm 離れた位置において中心部よりも小さな記録電流で磁区を形成することができている。これは磁性細線端部においては中心部に比べ反磁界が小さいうえ、記録ヘッドからの斜めの磁界成分によって磁化が反転しやすくなり、小さな磁界によっても磁区が形成されたものと考えられる。これらの結果からサンプルステージが熱ドリフトの影響を受けて移動したとしても記録ヘッドにより確実に磁区が形成することが可能となった。

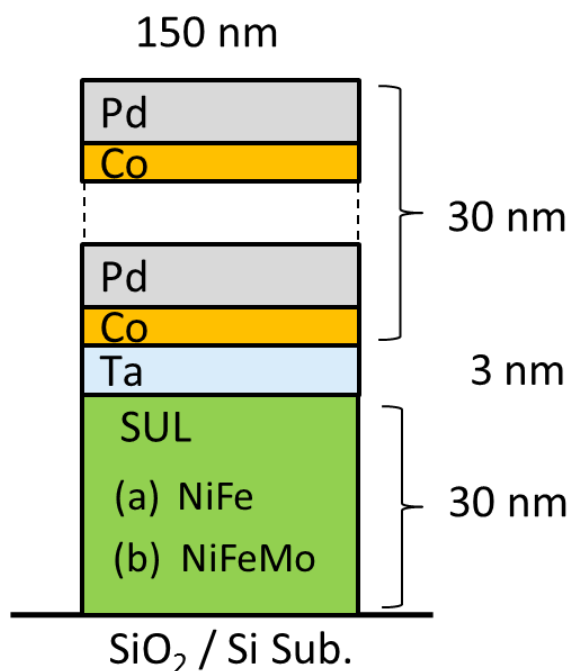


図 6-7 SUL を付与した [Co/Pd] 磁性細線の膜構造

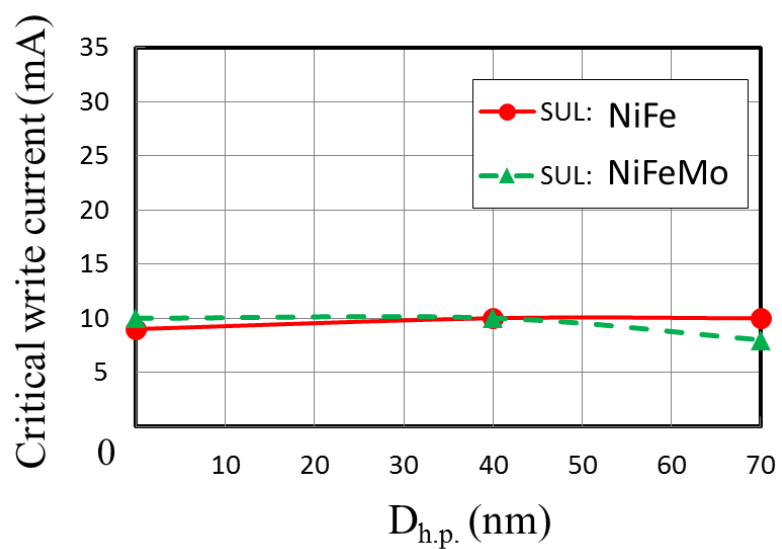


図 6-8 SUL を持つ磁性細線における細線中心と記録ヘッドの中心部分との
相対距離 $D_{h.p.}$ と磁区形成に必要なしきい記録ヘッド電流の関係

6.4 SULを持つ[Co/Pd]垂直磁化磁性細線における磁区の記録・駆動・再生実験

SULを持つ[Co/Pd]磁性細線へ図6-1の記録・駆動・再生実験装置を用いて磁区を記録しながら電流を印加し、再生ヘッドの出力信号の変化を測定した。磁性細線はあらかじめ細線全体の磁化方向が下向きとなるように外部磁場を印加した後、サンプルステージに設置した。記録ヘッドには2秒に1回100msの間40mAのパルス電流を印加し、上向き磁区を形成するための磁界を発生させた。同時に磁区駆動のため、細線の長さ方向に電流密度 1.3×10^8 A/cm²で、1msに1回、10.7nsのパルス電流を連続的に印加した。このときの再生ヘッド出力の変化を図6-9に示す。記録電流および駆動電流を印加し始めてから約9秒後にはじめて上向き磁区が再生ヘッド位置に到達した様子が検出され、その後、約2秒の間隔で上向き磁区の信号が再生ヘッドを通過する様子を検出することができた。これらの結果から、本研究で試作した仮想的な磁性細線記録素子において磁区の形成（記録）、駆動、検出（再生）の一連の動作が可能であることを実証できた。ただし、図6-9の再生ヘッド出力の変化を見ると、通過する磁区の時間や上向き磁区が通過するタイミングにばらつきが見られることが確認できる。次に磁区駆動実験後の磁性細線の磁区構造を観察した磁束密度分布像を図6-10に示す。ここでも細線中の上向きの磁区の長さは200-300nmと一定でない様子が観察できた。これは磁区が電流により駆動する際、各磁壁と面内磁化膜であるSULとの磁気的な相互作用が働いた結果、それぞれの磁壁の移動速度が不安定になったことが原因だと推測される。したがって、磁性細線記録デバイスを実現するためには各磁区の移動距離を制御するための構造が必要となる。また、[Co/Pd]細線中の磁区駆動の課題として、駆動可能な電流密度の範囲の狭さも挙げられる。図6-11に細線長さ方向に印加したパルス電流の電流密度を変化させたときの磁区記録・駆動・再生実験における再生ヘッド出力の変化を示す。電流密度が 1.3×10^8 A/cm²のときは駆動する磁区を検出できているが、 1.1×10^8 A/cm²のときには磁区を駆動することができず、 1.4×10^8 A/cm²のときには発生する熱により再生ヘッド直下の磁化方向がランダムに変化してしまった。このため、より低電流で高速に磁区を動かすことが研究を進めていくうえで必要となる。

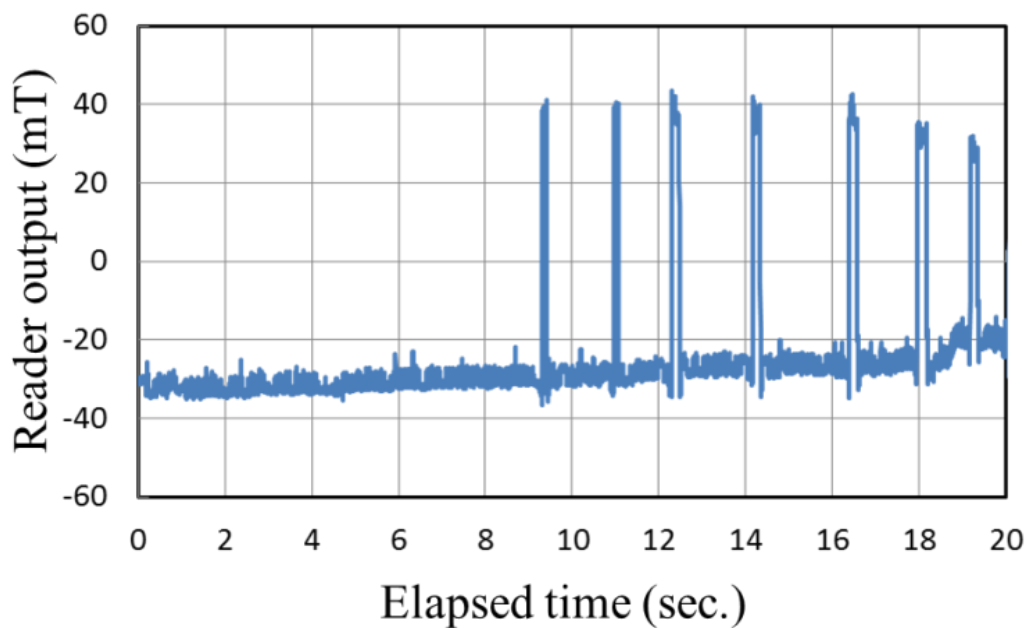


図 6-9 SUL を持つ磁性細線における磁区記録・駆動・再生実験の再生ヘッド出力変化

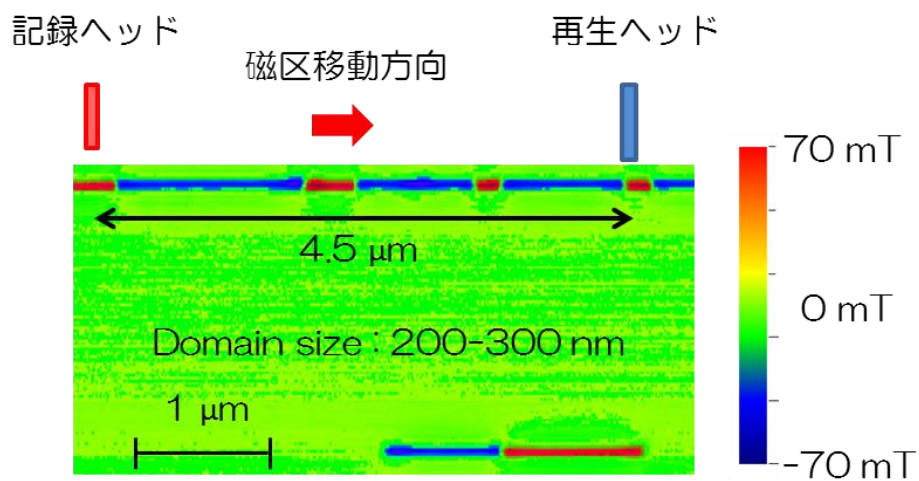


図 6-10 SUL を持つ磁性細線における磁区記録・駆動・再生実験後の磁束密度分布像

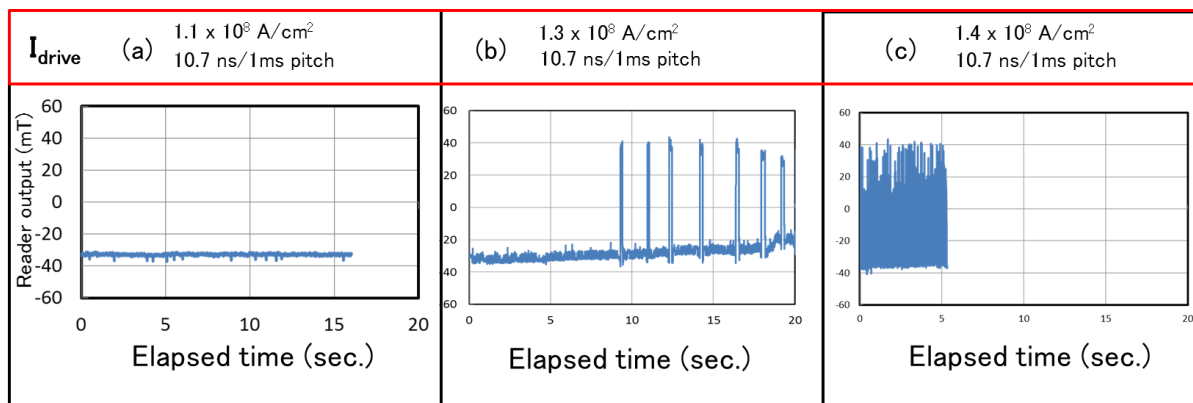


図 6-11 SUL を持つ磁性細線における磁区記録・駆動・再生実験時の
駆動電流密度による再生ヘッド出力の変化

6.5 まとめ

磁性細線へ磁区の形成（記録）、電流駆動、検出（再生）が一連の動作で可能となることを実証するため、磁気ヘッドを用いて磁区記録・駆動・再生実験装置を構築し、[Co/Pd]磁性細線を用いて仮想的に磁性細線記録素子を構成することで、その検証を行った。

あらかじめ、磁化方向をすべて下向きに揃えた[Co/Pd]磁性細線に対して、細線長さ方向に磁区駆動電流密度 1.1×10^8 A/cm²、1 ms に 1 回 4.5 ns のパルス電流を印加するとともに、記録ヘッドに電流を印加して磁区を形成した。再生ヘッド出力の変化から、記録ヘッドにより形成した磁区が磁性細線中を移動し、再生ヘッド直下を通過する様子をリアルタイムに検出することができたことで、磁性細線へ磁気ヘッドを用いて磁区を形成（記録）し、その磁区を電流駆動して検出（再生）できることを実証した。

ただし、記録電流は 2 秒に 1 回印加していたのにも関わらず、検出した上向き磁区は数秒に 1 回であり、再生ヘッドによる信号が欠落している部分が見られた。そこで、軟磁性下地層を磁性細線に付与することにより磁区を確実に形成できる磁性細線を作製した。その結果、磁区形成した間隔とほぼ同じ間隔で再生ヘッド直下を通過する磁区を検出することに成功し、磁区の形成（記録）、駆動、検出（再生）の一連の動作を実証した。軟磁性層を付与した磁性細線においてはそれぞれの磁壁の駆動速度が安定しない問題や、磁区が電流駆動する電流密度の範囲が非常に狭いという問題があるため、磁性細線を用いたメモリを実現するためには磁区駆動距離を制御する技術や、より低電流で磁区を駆動する材料開発が必要となる。

第7章 磁区駆動制御技術と高速駆動の検討

磁性細線中の磁区電流駆動を利用したメモリを実現するためには1bitの大きさ、つまり磁区の長さや停止位置を正確に制御する必要がある。加えて、磁区の高速度駆動や磁気ヘッドを用いた確実な磁区形成も不可欠となる。本章では、磁区の電流駆動距離を制御するため、様々な形状の磁壁トラップサイトを[Co/Pd]垂直磁化磁性細線上に配置し、その効果を確認した。また、磁区駆動の高速度化に向けて主に細線の磁化を小さくする方法で検討を行ったので、その効果について検証した。次に、安定した磁区形成の実現を目指して、磁気ヘッド中のヒーターを利用した磁性細線へのヘッド近接手法について検討した。

7.1 磁壁トラップサイトによる磁区駆動距離制御の検討

7.1.1 くびれ形状による磁壁トラップサイト

磁性細線中の磁壁を繫止する手段として最もよく用いられているのがくびれ形状の磁壁トラップサイト[30], [31]である。くびれ状の磁区トラップサイトを細線上に規則的に配置することで磁壁の挙動を制御できることが提案されている。くびれ形状の磁壁トラップサイト上に磁壁がとどまっている様子を観察したものを図7-1に示す。

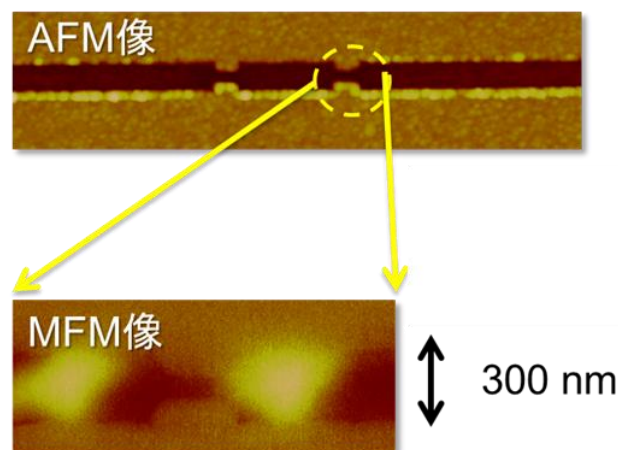


図7-1 くびれ形状における細線の磁区構造の磁気力顕微鏡像

くびれによる磁壁トラップサイトはくびれの形状を細線形状とともに電子線描画装置により形成する必要がある。そのため、電子ビーム径によりくびれ形状の大きさが決まり、20 nm 以下の大きさのくびれを作ることが難しい。細線の両側の壁沿いにくびれがある構造を作ろうとするとそれだけで 40 nm 以上の大きさとなり、150-200 nm の幅をもつ細線においては磁壁をトラップするエネルギーが大きすぎるという問題があった。

そのため深さ方向にくびれを作製し、より小さなトラップエネルギーを実現することができないか検討した[32]。図 7-2 にその作製方法を示す。磁性細線を作製した後、原子間力顕微鏡のナノスクラッチ機能によりダイヤモンドプローブを細線表面に接触させた後、一定の力でプローブを押しつけながら細線幅方向に動かすことで溝を作製した。溝の深さはピエゾ素子に印加する電圧の大きさに制御することができる。

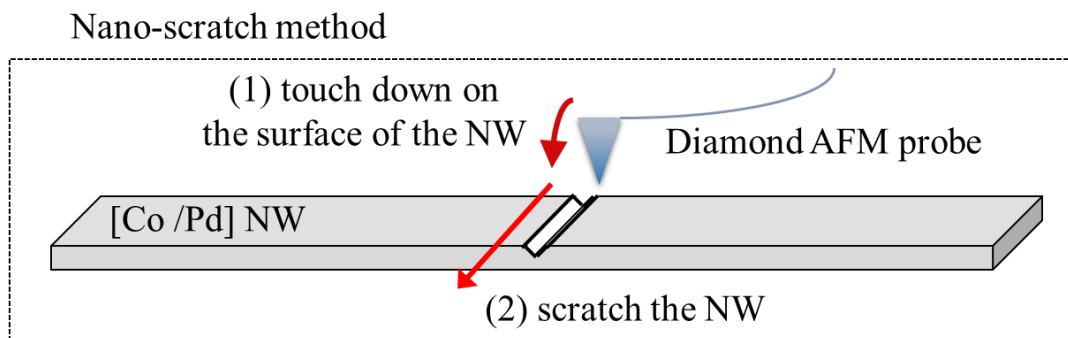


図 7-2 原子間力顕微鏡を用いた磁性細線への溝加工法

図 7-3 に磁壁トラップサイトとして表面に溝を付与した [Co/Pd] 磁性細線の原子間力顕微鏡像とその断面プロファイルを示す。およそ 40 nm の細線の厚さに対し、10-15 nm 程度の深さの溝が細線上に形成されている様子がわかる。図 7-4 はこの細線に対し、外部磁界を印加することによって磁壁のトラップ効果を確認したものである。図 7-4 (a) はナノスクラッチ法により表面に 2 本の溝を形成した [Co/Pd] 磁性細線の原子間力顕微鏡像、(b) は細線裏側から表側に向けて 10 kOe の磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像、(c) はその後細線表側から裏側に向けて 1 kOe の磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像、(d) はさらに細線表側から裏側に向けて 2 kOe の磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像、(e) はこの磁性細線の磁気光学カー効果による垂直方向の磁化曲線である。

図 7-4 (c) に示されるように溝と溝の間に挟まれた領域において、4 つの磁区が観察され、磁壁がそれぞれの溝の位置でトラップされている様子が確認できた。このことから細線表面に溝を導入する場合でもその溝が磁壁トラップサイトとして機能することが確認できた。ただし、この溝を持つ細線においては磁壁をトラップする力が大きく、電流により磁壁を動かすことができなかったため、外部磁界により、磁壁をトラップする効果を調べた。

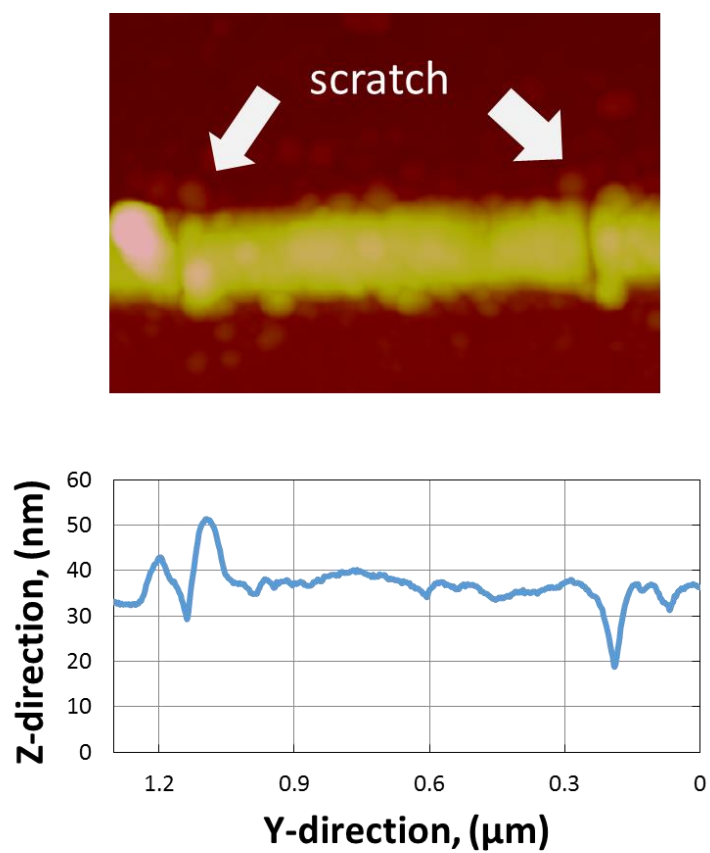


図 7-3 溝を付与した[Co/Pd]磁性細線の AFM 像とその断面プロフィール

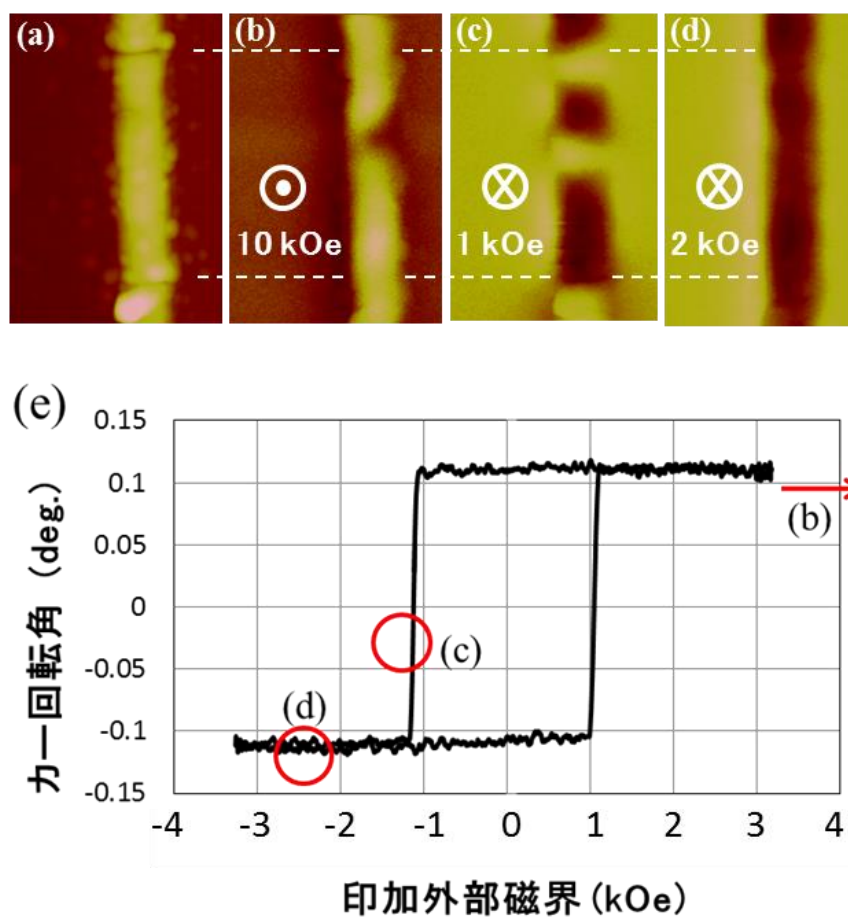


図 7-4 2本の溝を持つ[Co/Pd]磁性細線へ磁場印加時のMFM像と垂直磁気特性

7.1.2 陽極酸化による磁壁トラップサイト

くびれ形状の他に図 7-5 に示すような原子間力顕微鏡の陽極酸化法を用いて磁性細線表面を酸化させ表面の磁気特性を変化させることにより、磁区トラップサイトを形成することとした。表面が金属薄膜で覆われた導電性のプローブを用い、プローブと磁性細線の間 -4 V から -10 V までの範囲の電圧を印加することで酸化された領域を形成する。

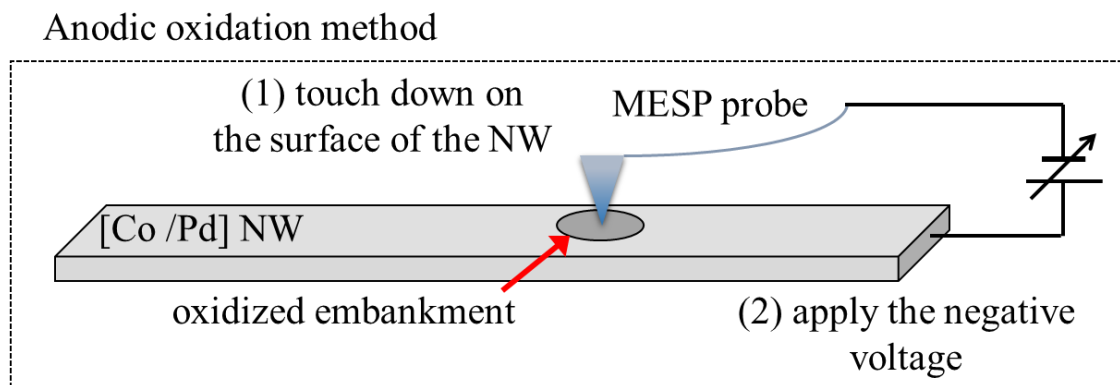


図 7-5 陽極酸化法を用いた磁性細線への酸化膜導入

図 7-6 に細線表面を陽極酸化した [Co/Pd] 磁性細線の原子間力顕微鏡像とその断面プロファイルを示す。およそ 40 nm の細線の厚さに対し、大きく盛り上がって酸化されている様子が観察できた。

図 7-7 (a) は陽極酸化法による 1 つの酸化膜部分を持つ [Co/Pd] 磁性細線の原子間力顕微鏡像、(b) は細線裏側から表側に向けて 10 kOe の磁界を印加した後、細線表面から裏面に向けて 900 Oe の磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像、(c) はさらに細線表側から裏側に向けて 1 kOe の磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像である。 1 kOe の磁界印加後、細線中に上向きと下向きの 2 つの磁区が存在している様子が確認できる。磁氣的に異質な酸化部分もまた、磁壁トラップサイトとして機能することを確認できた。

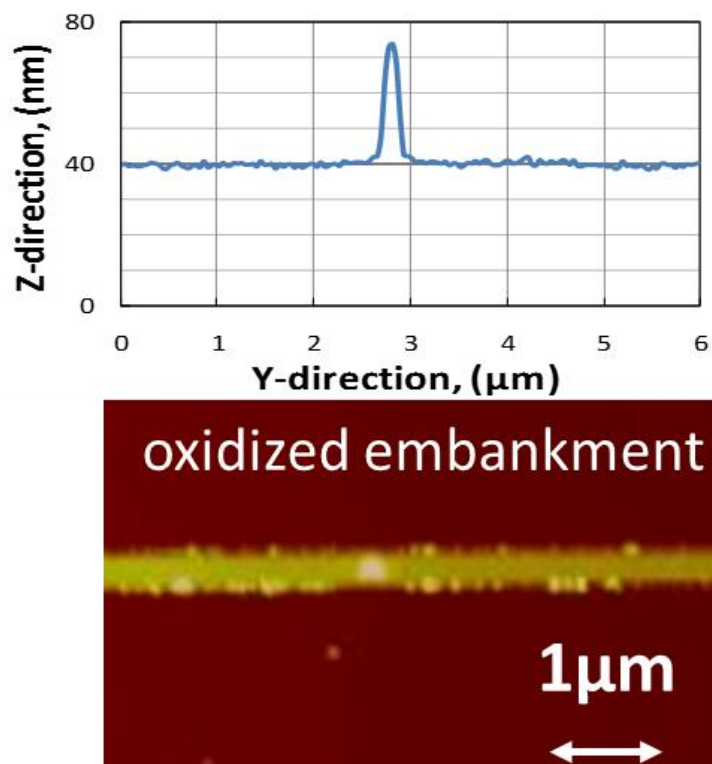


図 7-5 酸化領域を持つ [Co/Pd] 磁性細線の AFM 像とその断面プロファイル

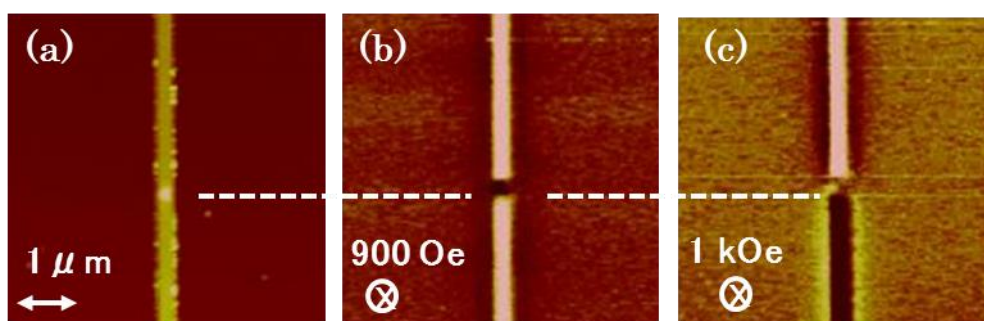


図 7-6 酸化領域を持つ [Co/Pd] 磁性細線の AFM 像と外部磁場を印加したときの MFM 像の変化

7.1.3 くぼみによる磁壁トラップサイト

くびれによる磁壁トラップが可能であるならばくぼみ状の形状を利用することで弱い磁壁トラップサイトを実現できないか検討した。図7-8に原子間力顕微鏡のナノインデンテーション機能を利用した磁性細線へのくぼみ作製方法を示す。ダイヤモンドプローブを細線表面に接触させ、押し込むことで三角錐型のくぼみが形成される。この深さは、ピエゾ素子に印加する電圧の大きさを制御することができる。

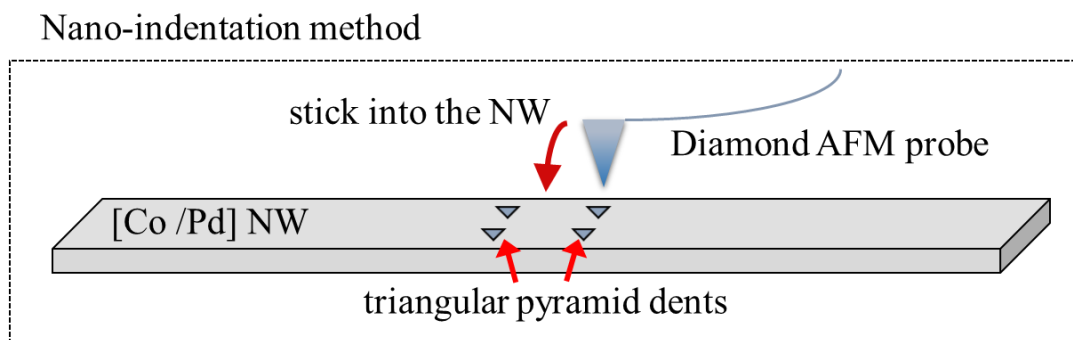


図7-8 ナノインデンテーション機能を利用した磁性細線へのくぼみ作製方法

図7-9に表面にくぼみを付与した[Co/Pd]磁性細線の原子間力顕微鏡像とその断面プロファイルを示す。およそ40 nmの細線の厚さに対し、10 nm程度の深さのくぼみが細線上に形成されている様子がわかる。図7-10(a)はナノインデンテーション法による3組のくぼみ部分を持つ[Co/Pd]磁性細線の原子間力顕微鏡像と(b)は細線裏側から表側に向けて10 kOeの磁界を印加した後、細線表面から裏面に向けて400 Oeの磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像、(c)はさらに細線表側から裏側に向けて500 Oeの磁界を印加した後の磁気力顕微鏡像である。およそ500 Oeの外部磁場により図に示されるように、磁区が上向きから下向きへと反転し始め、それぞれのくぼみが磁壁のトラップサイトとして働いた。ただし、これまで2つのトラップサイトと比べ磁区が反転し始める磁界が小さく、細線の静磁気エネルギーが小さくなっているものと考えられる。

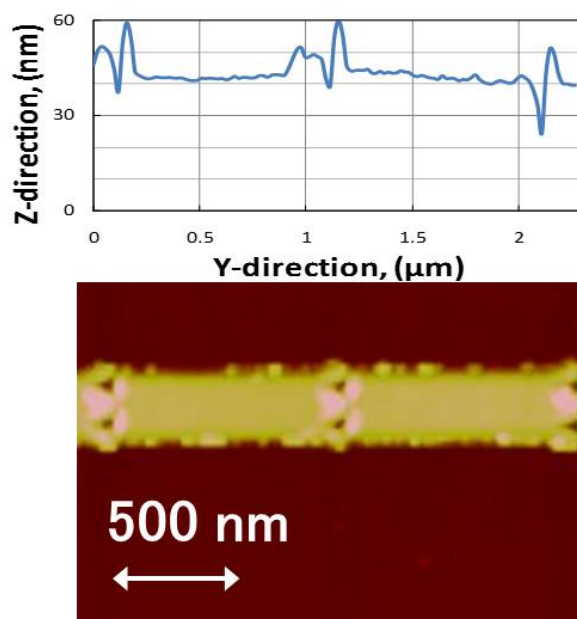


図 7-9 くぼみを持つ [Co/Pd] 磁性細線の AFM 像とその断面プロファイル

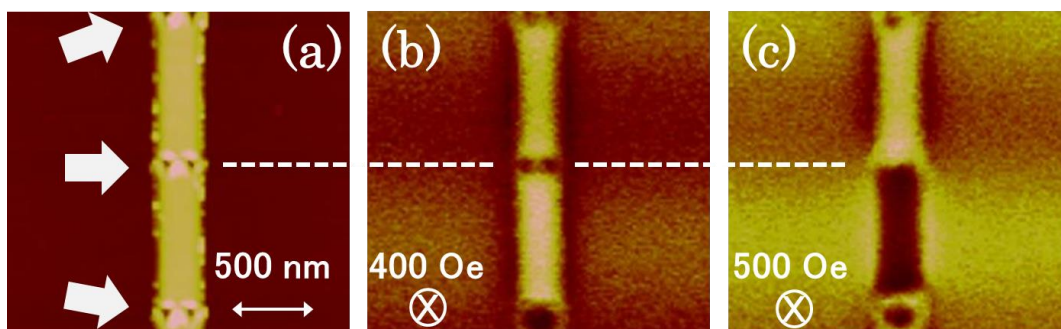


図 7-10 くぼみを持つ [Co/Pd] 磁性細線の AFM 像と外部磁場を印加したときの MFM 像の変化

7.1.4 段差による磁壁トラップサイト

これまで微小な磁壁トラップサイトを形成するために原子間力顕微鏡による加工を検討してきた。どの方法においても磁壁を係止する効果は確認できたものの、磁性細線中に多くのトラップサイトを規則的に導入していくことは原理的に難しい。そこで基板を加工することにより磁壁トラップサイトを導入する方法を考案した。図 7-11 に示すように、はじめにナノインプリントリソグラフィにより基板表面に複数の周期的な溝構造を形成する。続いてその基板上に溝に直交する形で磁性細線を作製することにより、一定の間隔で規則的に並んだ段差状のくびれを細線上に作製することができる。

図 7-12 にナノインプリントリソグラフィの手順を示す。はじめに紫外線硬化樹脂を基板表面にスピンコートする。次に上記パターンが彫刻された石英製モールドを基板に押し付け、紫外線を照射することにより樹脂を硬化させる。モールドから離型した後、反応性イオンエッチングにより基板表面を加工する。溝の深さはエッチング時間により制御し、4 nm および 10 nm とした。最後に紫外線硬化樹脂を剥離し、微小溝加工基板を得る。

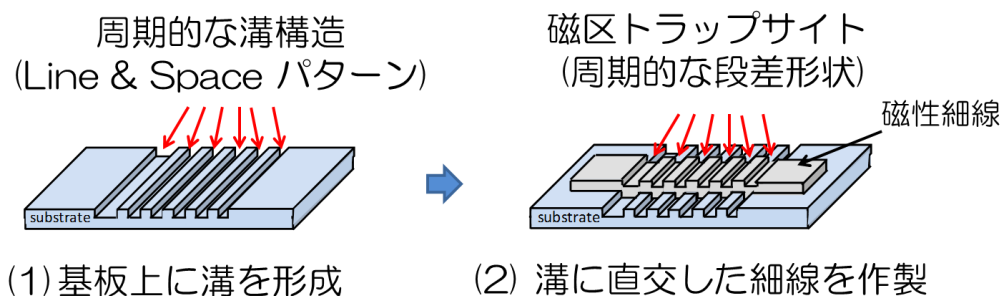


図 7-11 基板上の段差構造を利用した磁区トラップサイトの作製方法

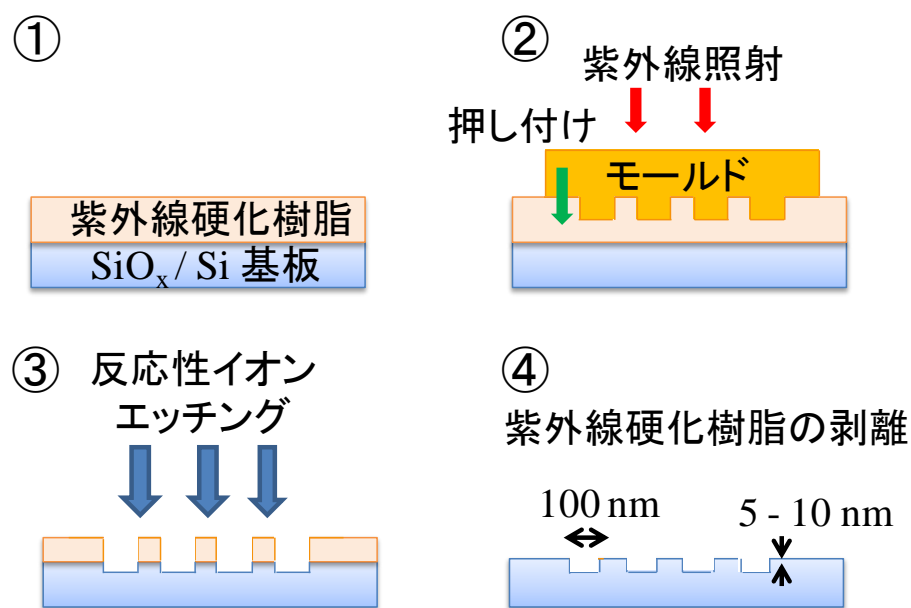


図 7-12 ナノインプリントリソグラフィーによる基板加工の手順

図 7-13 に通常基板および 10 nm の深さの溝構造を持つ基板上に作製した [Co/Pd] 磁性細線の垂直磁気特性および外部磁界印加により磁区構造が変化する様子を示す。磁区構造の変化は 2 μm の長さのマーカに挟まれるようにして配置した 8 本の磁性細線の磁区が外部磁界印加により変化する様子を調べた。段差部分を持たない細線では磁化方向が一斉に変化したのに対し、10 nm の段差を持つ細線においてはその段差部分により磁壁の広がり制限されるように磁区構造が変化した。また、MOKE 測定により得られた細線の垂直磁気特性においても保磁力が増加した結果が得られており、磁壁をトラップする効果が強いことがわかる。図 7-14 に通常基板および 4 nm の深さの溝構造を持つ基板上に作製した [Co/Pd] 磁性細線の垂直磁気特性および外部磁界印加により磁区構造が変化する様子を示す。こちらの細線では外部磁界印加時にわずかに磁壁が段差部分にトラップされる様子が観察できたが、段差の持つ磁性細線においてもほとんどの細線の磁化方向が外部磁界により一斉に反転した。MOKE 測定により得られた垂直磁気特性を比較しても保磁力がわずかに増加した結果が得られたが、ほぼ同様の磁気特性であった。そのため、4 nm の段差は磁壁をトラップする効果が弱いことが確認できる。

これらの段差をもつ [Co/Pd] 磁性細線に電流を流して磁区構造の変化する様子を磁気力顕微鏡により観察した結果が図 7-15 である。ともに 500 ns のパルス幅の電流を流したが 10 nm の段差を持つ細線では $2.71 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度の電流では全く磁区は動かなかった。 $2.92 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度の電流を印加したところ熱により磁化方向が不規則に変化し、電流印加前の磁区構造が失われてしまう結果となった。対して 4 nm の段差を持つ細線においては $2.40 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ の電流密度の電流を印加したところそれぞれの磁区が 100 nm ずつ溝の幅と同じ距離だけ移動した。再び同じ電流を印加して磁区構造を測定したところ、同様に 100 nm ずつ移動する様子が観察できた。このことから、基板加工による周期的な磁区トラップサイトは磁区駆動距離制御に非常に有効な方法であることが確認できた。

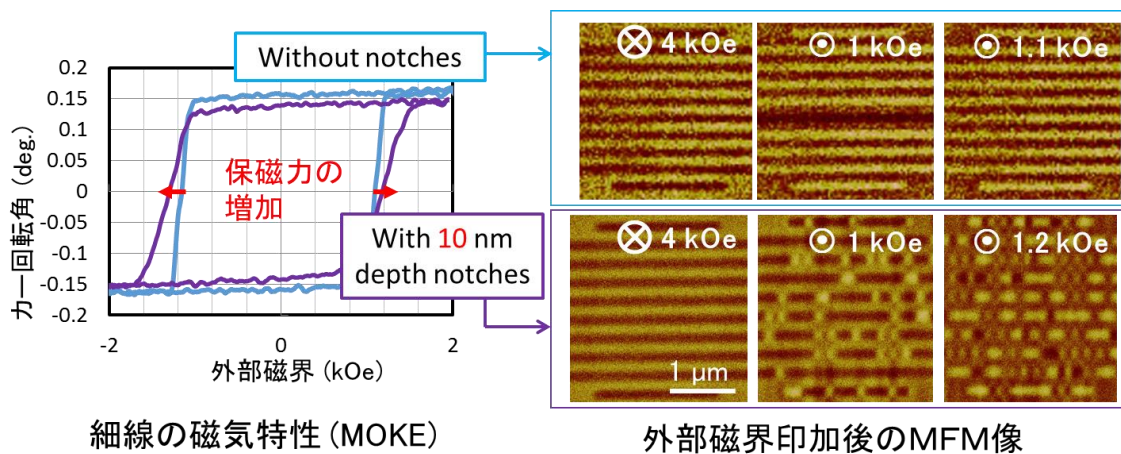


図 7-13 通常基板および 10 nm の深さの溝構造を持つ基板の上に作製した [Co/Pd] 磁性細線の垂直磁気特性および外部磁界印加による磁区構造の変化

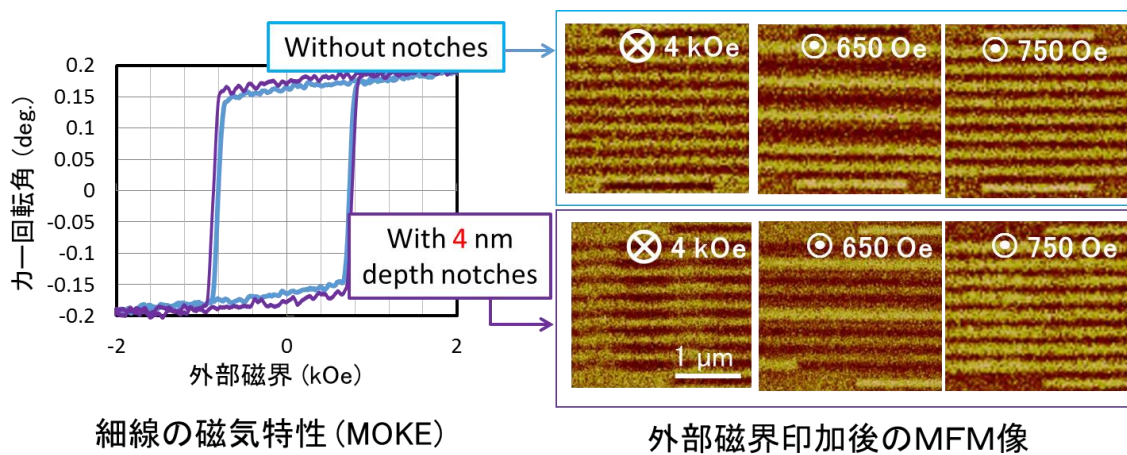


図 7-14 通常基板および 4 nm の深さの溝構造を持つ基板の上に作製した [Co/Pd] 磁性細線の垂直磁気特性および外部磁界印加による磁区構造の変化

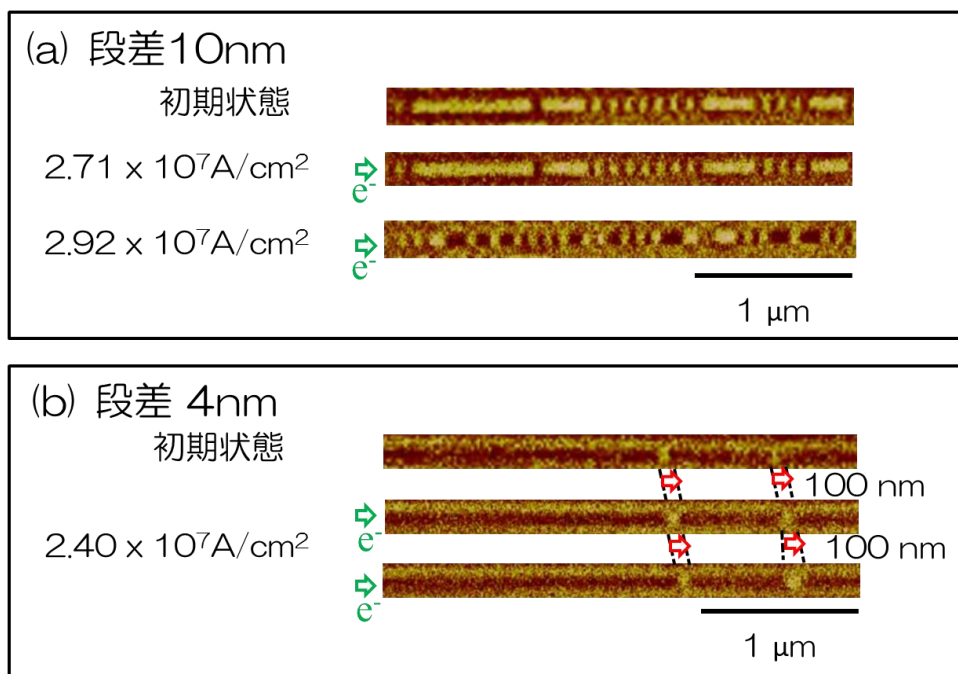


図 7-15 (a) 10 nm および (b) 4 nm の深さの溝構造を持つ基板上に作製した [Co/Pd] 磁性細線におけるパルス電流印加後の磁区構造の変化

7.2 高速磁区駆動の検討

これまでの研究で[Co/Pd]磁性細線においては磁区の駆動速度は遅く、駆動するのに必要な電流密度の範囲が非常に狭いという問題があった。そこで磁区の高速駆動に関する検討を行った。強磁性材料において伝導電子から磁気モーメントにトランスファーされたスピン角運動量がすべて磁壁駆動に使われたとすると、磁壁の駆動速度は以下の式で表わされる[33], [34]。

$$v = \frac{\mu_B p j}{e M_S}$$

ここで j は磁性細線に印加する電流の密度、 p は磁性細線材料のスピン偏極率、 μ_B はボーア磁子、 e は電子の電荷量、 M_S は磁性細線材料の飽和磁化である。この式から飽和磁化を下げることであれば磁壁が高速に動くことが示唆されている。

そこで磁性細線の飽和磁化を低下させるために Ru 層による層間交換結合を用いた人工反強磁性結合を利用することとした。これは Ru 層を中間層として上下層に強磁性層を配置したとき、Ru 層の厚さを調整することで上層と下層の磁化の向きが逆向きに揃う現象である。全体の磁化の大きさはフェリ磁性体のように内部の上向きの磁化の大きさと下向きの磁化の大きさの和になるため上下の磁性層の構成により磁化を小さくすることができる。そこで図 7-16 に示す構造の薄膜を作成し、Ru 層の厚さによりどのように磁気特性が変化するか調べることにした。図 7-17 は層間結合時の磁化の大きさと交換結合磁界の大きさの Ru 膜厚依存性を示したものである。Ru 層厚が 0.25 nm を超えると上下層が反強磁性的に結合する。Ru 層厚が 0.3-0.4 nm では交換結合磁界も大きくなり、細線の保磁力が増加することがわかった。そこで Ru 膜厚 0.3 nm で磁性細線への加工を行い、磁区駆動の様子を観察した結果が図 7-18 である。ただし、磁性細線に加工した際のプロセスの問題か細線の状態では上下層は反強磁性的に結合せず、同様の膜厚の [Co/Pd] 磁性細線と比べて飽和磁化もわずかに下がったのみであった。磁区駆動に必要な電流密度はわずかに低下しており、細線加工プロセスを見直すことで高速磁区駆動の検討を進めていく予定である。

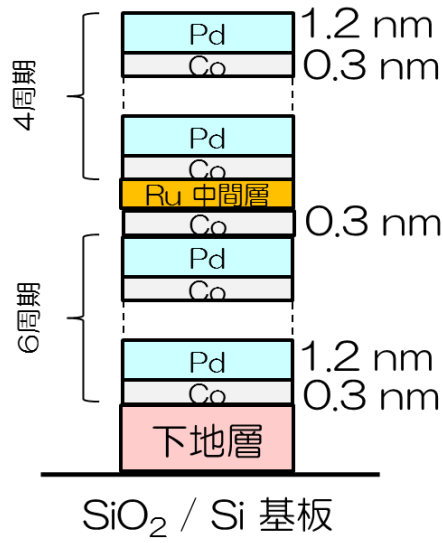


図 7-16 Ru を中間層とする [Co/Pd] 多層膜の構造

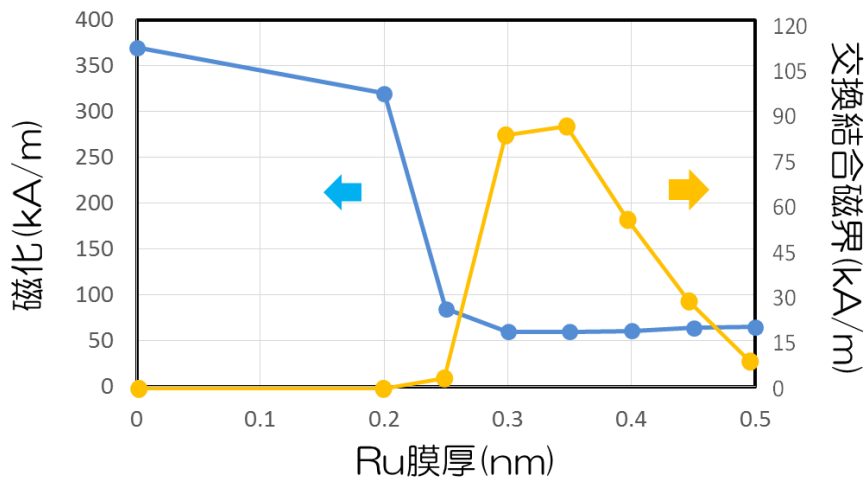


図 7-17 層間結合時の磁化の大きさや交換結合磁界の Ru 中間層厚依存性

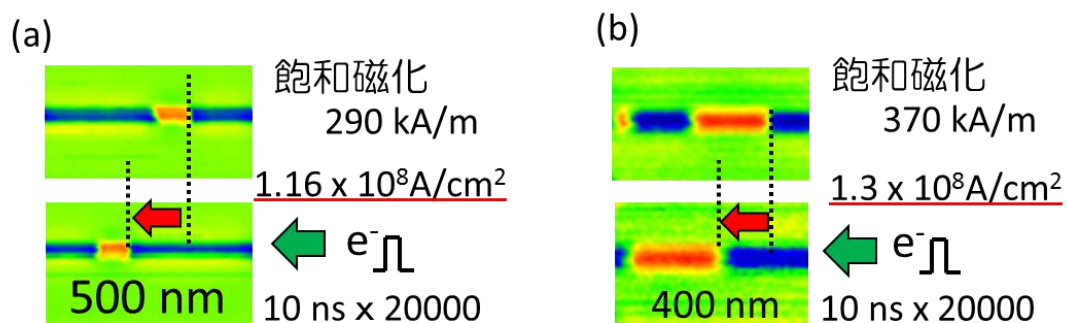


図 7-18 (a) Ru を中間層とした [Co/Pd] 磁性細線と
(b) [Co/Pd] 磁性細線の磁区駆動電流印加前後の磁区構造の比較

7.3 磁気ヘッドのヒーター利用による記録効率の改善

第6章で実証したように磁性細線に軟磁性下地層(SUL)を付与すると安定して磁区形成できるが、電流駆動の際に磁区長が不安定になるという問題があった。そこで、SULのない磁性細線においても安定して磁区形成・磁区駆動できるよう、記録ヘッドヒーター[35]を利用することにより、磁気ヘッドを固定したときのヘッド細線間距離を縮めることができるか検討を行った。

ヘッドヒーターに電圧を印加したときにヘッド先端部分が熱膨張する様子を表した模式図を図7-19に示す。HDDに利用されている磁気ヘッドにはヒーターが内蔵されており、ここに電圧を印加することで記録媒体にヘッドをさらに近接させることができる。これを利用してヘッドを近接させることで、磁区形成に必要な電流がどのように変化するのか調べた。

図7-20に測定に用いた[Co/Pt]垂直磁化磁性細線のMOKE測定による垂直磁化磁気特性の測定結果を示す。[Co/Pt]多層膜は[Co/Pd]多層膜に比べ保磁力が低く、今回用いた細線ではおよそ500 Oeの保磁力であった。ヘッドと細線の距離が離れていても磁区形成ができるようにこの記録実験には保磁力の低い細線を用いることとした。図7-21にヒーターに電圧を印加したときの記録電流と実際に[Co/Pt]磁性細線に磁区を記録できた確率との関係を示す。ヒーターに印加する電圧の上昇に伴い、磁区を形成できる電流値が低下していることが確認できた。記録ヘッドと同じく、ヒーターにより細線に近接することになる再生ヘッド出力の変化から磁気ヘッドがどれだけ磁性細線に近づいたのかを計算した結果が図7-22である。ヒーターに印加する電圧が上昇するにつれて磁気ヘッドは磁性細線に近づき、3Vのヒーター電圧印加によっておよそ9 nmヘッドが磁性細線に近づくことがわかった。磁気ヘッドのヒーターを利用することで磁性細線に記録ヘッドを接触させることも可能になるため、SULのない磁性細線にも磁区を形成しやすくなることが期待できる。

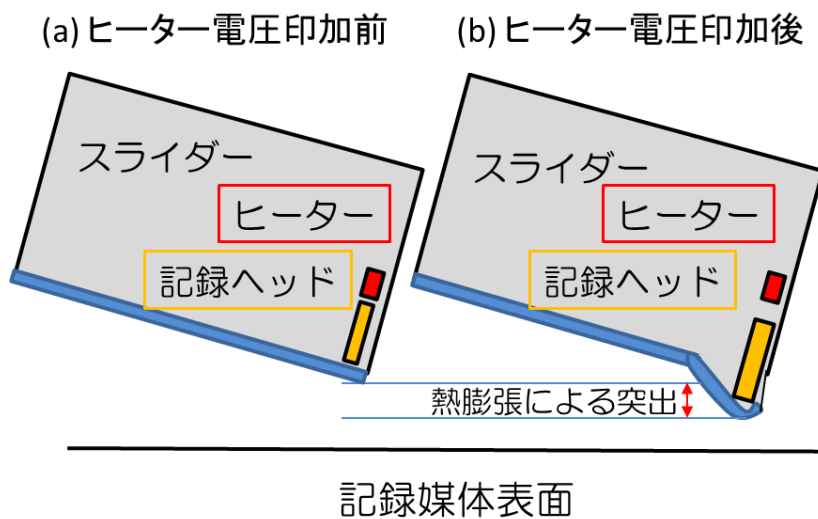


図 7-19 ヘッドヒーター利用時の磁気ヘッド先端の変化を表した模式図

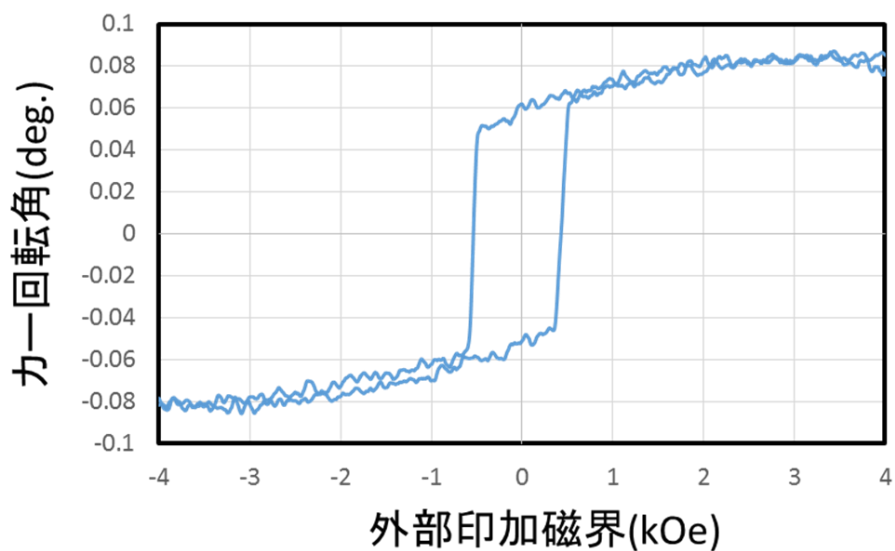


図 7-20 MOKE 測定による [Co/Pt] 磁性細線の垂直磁気特性

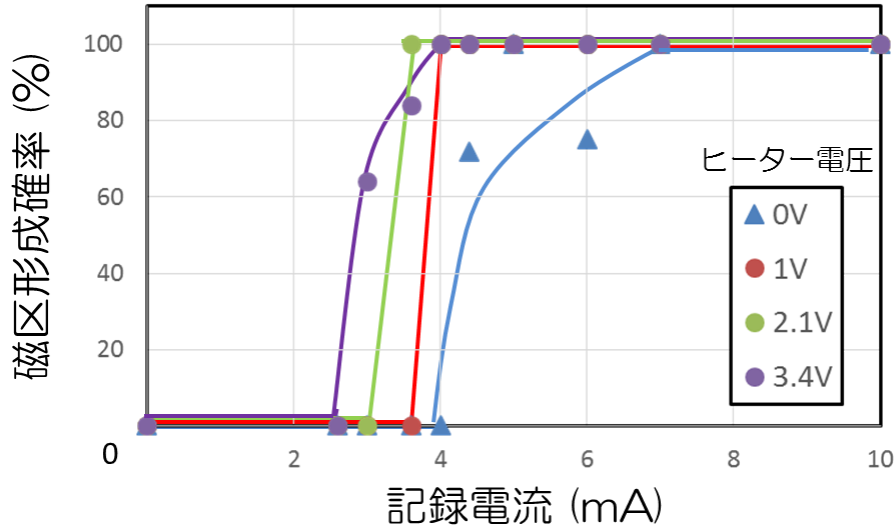


図 7-21 磁気ヘッド中のヒーターに電圧を印加したときの記録電流と [Co/Pt] 磁性細線への磁区形成確率の関係

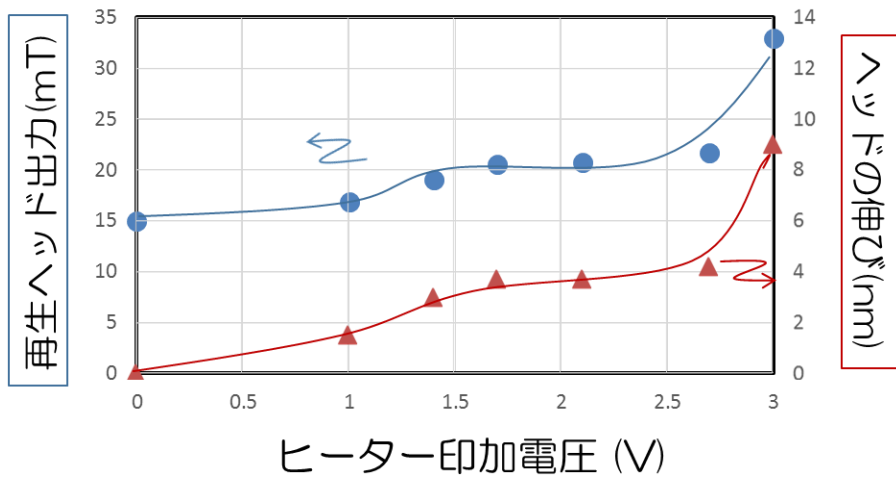


図 7-22 再生ヘッド出力の変化から計算した磁気ヘッド先端が細線に近接した距離とヒーター印加電圧の関係

7.4 まとめ

磁性細線メモリを実現するために磁区駆動距離の制御手法と磁区の高速駆動材料、ヒーターを利用した記録ヘッドの細線への近接手法について検証した。

磁区駆動距離制御については磁性細線に構造的な磁壁トラップサイトを形成することによる磁区駆動距離制御手法について検討した。基板上に非常に浅い溝構造を導入することで磁性細線に段差を形成し、周期的に磁壁トラップサイトを導入可能であることを示した。また、この段差が 4 nm のときに [Co/Pd] 磁性細線において、基板に導入した溝幅と同じ 100 nm 単位での磁区のシフト駆動を実証し、電流駆動距離の制御が可能であることを示した。

磁区の高速駆動材料については Ru 層を中間層とすることで [Co/Pd] 磁性層を用いてフェリ磁性的な結合を持つ薄膜を形成する条件を見出した。細線加工後にその磁気特性を維持することができなかつたため、加工プロセスに関しては検討を継続していく。

また、ヒーターを利用した記録ヘッドの細線への近接手法については 9 nm 程度磁気ヘッドを近接できることが確認できた。SUL を持たない磁性細線への磁区形成に応用することで、細線構造や電極構造も含めた改善を行っていく予定である。

第8章 結論

8.1 結論

本論文では将来の超高速磁気記録を実現するため、スピントランスファートルクによる磁壁駆動を用いた磁性細線メモリの記録・再生制御に関する研究を行った。磁性細線への磁区の記録・駆動・再生を実証するため、ハードディスクドライブ用の磁気ヘッドを利用して、垂直磁化磁性細線と組み合わせて仮想的な磁性細線記録素子を構成することとし、磁区形成、磁区駆動、磁区検出それぞれの要素について実現する条件を検討した。さらに磁性細線メモリ実現に向けた磁区の駆動距離制御法に関する検討、高速磁区駆動を目指した細線材料の開発、確実な磁区形成のためのヒーターによるヘッド近接技術の検証を行った。

第 3 章では磁性細線を用いた磁気記録デバイスの検証を行うため、まず [Co/Pd] 人工格子多層膜を用いて磁性細線を作製することとした。[Co/Pd] 多層膜では 21 周期以下の膜構造において良好な垂直磁気特性を示したため、この構造の多層膜を用いて磁性細線を作製した。細線に加工後は線幅 250 nm 以下の構造において細線幅方向に単一の磁区構造をとることが確認できたため、幅 150 nm の [Co/Pd] 磁性細線を用いて磁区駆動実験を行うこととした。

第 4 章では磁気ヘッドを用いた駆動磁区観察装置を構築し、磁性細線に接触させた再生ヘッドの抵抗値の変化により、磁性細線中を電流駆動する磁区をリアルタイムに検出することとした。まず、[Co/Pd] 磁性細線における電流磁区駆動を観察し、パルス電流を複数回印加することで、磁区が電子の流れる方向に移動することを確認した。このことからスピントランスファートルクによる電流磁壁駆動により、磁性細線中の磁区が移動したと考えられる。続いて駆動した磁区の周辺に再生ヘッドを固定し、その抵抗値の変化を観察することで駆動磁区の検出が可能か検証した。細線長さ方向へのパルス電流の印加に伴い、電子の流れる方向に移動する磁壁を検出したことにより、再生ヘッドを用いた駆動磁区の検出を実証した。

第 5 章では磁気ヘッドにより磁性細線へ磁区形成できる条件を検証するため、記録ヘッドに電流を印加しながら、磁性細線上を走査することで磁性細線へ磁区を導入した。このとき、電極上にヘッド先端の ABS 面が乗ってしまうことにより、磁性細線と

記録ヘッド間のギャップが約 60 nm と非常に大きくなることで、記録ヘッドから発生した磁界により磁区を形成できないことがわかった。そこで、電極構造を 2 層とし、細線周辺の電極の高さを低くすることにより、記録ヘッドを細線に近接させた。ヘッドの DLC 保護膜を 1 nm とし、磁性細線と記録ヘッド間のギャップを 1 nm に近づけることで、14 mA 以上の記録電流印加により磁区がほぼ確実に形成できることを確認した。また、磁気ヘッドを磁性細線上に固定した状態で記録電流を印加することにより磁区形成を行ったところ、形成された磁区の大きさは細線長さ方向におよそ 100 nm となり、記録ヘッドの大きさに比べて広がって磁区が形成されることがわかった。

第 6 章では磁性細線へ磁区の形成（記録）、電流駆動、検出（再生）が一連の動作で可能となることを実証するため、磁気ヘッドを用いて磁区記録・駆動・再生実験装置を構築し、[Co/Pd] 磁性細線を用いて仮想的に磁性細線記録素子を構成することで、その検証を行った。あらかじめ、磁化方向をすべて下向きに揃えた [Co/Pd] 磁性細線に対して、細線長さ方向に磁区駆動電流密度 1.1×10^8 A/cm²、1 ms に 1 回 4.5 ns のパルス電流を印加するとともに、記録ヘッドに電流を印加して磁区を形成した。再生ヘッド出力の変化から、記録ヘッドにより形成した磁区が磁性細線中を移動し、再生ヘッド直下を通過する様子をリアルタイムに検出することができた。このことから、1 本の磁性細線において磁気ヘッドを用いて磁区を形成（記録）し、その磁区を電流駆動して検出（再生）できることを実証できた。

ただし、記録電流は 2 秒に 1 回印加していたのにも関わらず、検出した上向き磁区は数秒に 1 回であり、再生ヘッドによる信号が欠落している部分が見られた。そこで、軟磁性下地層を磁性細線に付与することにより磁区を確実に形成できる磁性細線を作製した。その結果、磁区形成した間隔とほぼ同じ間隔で再生ヘッド直下を通過する磁区を検出することに成功し、磁区の形成（記録）、駆動、検出（再生）の一連の動作を実証した。軟磁性層を付与した磁性細線においてはそれぞれの磁壁の駆動速度が安定しない問題や磁区が電流駆動する電流密度の範囲が非常に狭いという問題があるため、磁性細線を用いたメモリを実現するためには磁区駆動距離を制御する技術や、より低電流で磁区を駆動する材料開発が必要となる。

第 7 章では磁性細線メモリを実現するために磁区駆動距離の制御手法と磁区の高速度駆動材料、ヒーターを利用した記録ヘッドの細線への近接手法について検証した。

磁区駆動距離制御については磁性細線に構造的な磁壁トラップサイトを形成することによる磁区駆動距離制御手法について検討を行い、基板上に非常に浅い溝構造を導入することで磁性細線に段差を形成し、周期的に磁壁トラップサイトを導入可能であることを示した。また、この段差が4 nmのときに[Co/Pd]磁性細線において溝幅と同じ100 nm単位での磁区のシフト駆動を実証し、駆動距離の制御が可能であることを示した。

磁区の高速駆動材料についてはRu層を中間層とすることで[Co/Pd]磁性層を用いてフェリ磁性的な結合を持つ薄膜を形成する条件を見出したが、細線加工後にその磁気特性を維持できなかったため、加工プロセスに関しては検討を継続していく。

ヒーターを利用した記録ヘッドの細線への近接手法については9 nm程度磁気ヘッドを近接できることが確認できたため、SULを持たない磁性細線への磁区形成に応用し、細線構造や電極構造も含めて改善を行っていく予定である。

以上の結果から、本研究の課題であった磁性細線への磁区の記録・駆動・再生を実証するとともに、基板加工を用いて磁性細線中に微小な段差構造を構成することで、電流磁区駆動距離の制御が可能になることを示した。

8.2 今後の展望

以下ではスピントランスファートルクを用いた磁性細線メモリの今後の展望を述べる。

高速に電流磁区駆動する細線材料の開発に向けて、本論文で検討した磁化の小さな材料とともに、高スピン偏極材料を用いた電流磁区駆動を検討していく。磁性細線記録デバイスの実現に向けては、スピン注入磁化反転などを用いた磁区書き込みおよびMTJ素子による読み出しなどを組み合わせ、磁性細線記録素子の一体形成を実現していく。素子の一体化形成を行うことで、隣接磁性材料からの漏れ磁束による磁壁駆動速度低下の問題の解決が期待される。また、記録素子の作製を容易にするため、大型の記録ヘッドのような構造を形成し、複数の細線にわたって磁区を一括して導入する記録方式についても検討していきたい。本論文ではナノインプリント法による段差構造を磁区駆動距離制御に応用したが、細線幅方向にも同様の基板加工を適用して、薄膜を形成することにより、隣接細線との磁氣的、電氣的な絶縁を持たせることができれば、より容易な加工プロセスで高密度に磁性細線を並べることができる。こういった技術を組み合わせていくことで、記録デバイスへの応用へ近づくことが期待される。

謝辞

本論文を結ぶにあたり、研究をご指導いただきました中川茂樹教授に心より感謝いたします。中川先生には社会人博士課程在学中だけでなく、修士課程の2年間でもお世話になるとともに、卒業後の学会活動の場などを通じて様々なご助言をいただきました。

本論文の審査員としてご指導いただきました岩本光正教授、山田明教授、間中孝彰准教授、Pham Nam Hai 准教授に深く御礼申し上げます。また、本研究を進めるにあたり、構想発表会や中間審査においてご指導、ご助言いただきました小長井誠名誉教授、宮島晋介准教授に深く御礼申し上げます。

中川研究室および東京工業大学の関係者のみなさま、高村陽太助教には研究に関する議論から在学中の手続きまで様々なご配慮、ご協力をいただきました。深く感謝いたします。

社会人博士課程として通学するにあたり、様々なご配慮をいただくとともに、研究に関する議論や実験へ協力していただきました NHK 放送技術研究所の宮本泰敬博士、川那真弓氏、船橋信彦博士、宮下英一博士、斎藤信雄博士、石井紀彦博士、林直人部長をはじめとする関係者の皆様に深く御礼申し上げます。また、本研究および博士課程通学の機会を与えてくださった藤沢秀一所長、黒田徹所長に心より感謝申し上げます。

磁気ヘッドを用いた研究を進めるにあたり、TDK 株式会社の近松努氏、小川昭雄氏には様々なご助言をいただきました。深く感謝いたします。

最後にこれまでの研究生活を支えていただいた家族、友人に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Hayashida et al., “Development of 8K production system with 120-Hz frame frequency,” *SMPTE 2016 Annual Technical Conference & Exhibition*, Oct. 2016.
- [2] T. Misu, Y. Matsuo, S. Iwamura, and S. Sakaida, “Real-time video coding system for up to 4 K 120 P videos with spatio-temporal format conversion,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, Jan. 2015, pp. 52-55.
- [3] T. Soeno et al., “Development of 8 K-UHDTV system with wide-colour gamut and 120-Hz frame frequency,” *The Best of IET and IBC*, vol. 6, pp. 51-58, Sep. 2014.
- [4] M. Sugawara and K. Masaoka, “UHDTV image format for better visual experience,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 1, pp. 8-17, Jan. 2013.
- [5] Y. Shiroishi et al., “Future Options for HDD Storage,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816-3822, Oct. 2009.
- [6] S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, “Shingled recording for 2-3 Tb/in²,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3823-3829, Oct. 2009.
- [7] M. A. Seigler et al., “Integrated heat assisted magnetic recording head: Design and recording demonstration,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 119-124, Jan. 2008.
- [8] D. Weller et al., “A HAMR media technology roadmap to an areal density of 4 Tb/in²,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 1, Jan. 2014, Art. no. 3100108.
- [9] J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang, “Microwave assisted magnetic recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, pp. 25-131, Nov., 2008.
- [10] S. Greaves, Y. Kanai, and H. Muraoka, “Multiple Layer Microwave-Assisted Magnetic Recording,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 2, Feb. 2017, Art. no. 3000510.
- [11] A. Yamaguchi et al., “Real-space observation of current-driven domain wall motion in submicron magnetic wires,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 92, no. 7, p. 077205, 2004.

- [12] S. S. P. Parkin, M. Hayashi, and L. Thomas, “Magnetic domain-wall racetrack memory,” *Science*, vol. 320, no. 5873, pp. 190-194, 2008.
- [13] T. Koyama *et al.*, “Current-induced magnetic domain wall motion in a Co/Ni nanowire with structural inversion asymmetry,” *Appl. Phys. Exp.*, vol. 6, no. 3, p. 033001, 2013.
- [14] B. Do and H. Awano, “Field- and current-induced domain wall motion in Tb/Co multilayers in the presence of spin-orbit coupling-induced torques,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 11, Nov. 2014, Art. no. 1401704.
- [15] N. Ishiwata *et al.*, “High-Speed MRAM Based on Current-Induced Domain Wall Motion,” *Magn. Jpn.*, vol. 5, no. 4, pp. 178-183, 2010.
- [16] H. Tanigawa *et al.*, “Operating principle of a three-terminal domain wall device with perpendicularly magnetized Ta/CoFeB/MgO free layer and underlying hard magnets,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 6, p. 063002, 2014.
- [17] 「磁気便覧」、日本磁気学会 編、丸善出版社(2016)
- [18] L. Berger, “Exchange interaction between ferromagnetic domain wall and electric current in very thin metallic films,” *J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 6, pp. 1954-1956, 1984.
- [19] J.C. Slonczewski, “Current-driven excitation of magnetic multilayers,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 159, no. 1-2, pp. L1-L7, June 1996.
- [20] L. Berger, “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current,” *Phys. Rev. B*, vol. 54, no. 13, p. 9353, Oct. 1996.
- [21] 「垂直磁気記録の最新技術」、中村慶久 監修、シーエムシー出版(2007)
- [22] T. Koyama *et al.*, “Observation of the intrinsic pinning of a magnetic domain wall in a ferromagnetic nanowire,” *Nat. Mater.*, vol. 10, pp. 194-197, 2011.
- [23] H. Tanigawa *et al.*, “Domain Wall Motion Induced by Electric Current in a Perpendicularly Magnetized Co/Ni Nano-Wire,” *Appl. Phys. Exp.*, vol. 2, no. 5, p. 053002, 2009.

- [24] S. Li *et al.*, “Current-Induced Domain Wall Motion in TbFeCo Wires With Perpendicular Magnetic Anisotropy,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 6, pp. 1695–1698, June 2010.
- [25] D. Ngo, K. Ikeda, and H. Awano, “Direct Observation of Domain Wall Motion Induced by Low-Current Density in TbFeCo Wires,” *Appl. Phys. Exp.*, vol. 4, no. 9, p.093002, 2011.
- [26] T. Chikamatsu, A. Ogawa, and T. Mizuno, “nano-MDS ; Magnetic Domain Scope for wide area with nano order resolution,” *Magn. Jpn.*, vol. 6, no. 6, p. 357, 2011.
- [27] M. Okuda *et al.*, “Evaluation of magnetic flux distribution from magnetic domains in [Co/Pd] nanowires by magnetic domain scope method using contact-scanning of tunneling magnetoresistive sensor,” *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 17, p.17D113, 2014.
- [28] 「光メモリー光磁気メモリー総合技術集成」、桜井良文・龍岡静夫 監修、サイエンスフォーラム社(1983)
- [29] 「磁気イメージングハンドブック」、日本磁気学会 編、共立出版社(2010)
- [30] T. Ono *et al.*, “Magnetization reversal in submicron magnetic wire studied by using giant magnetoresistance effect,” *Appl. Phys. Exp.*, vol. 72, no. 9, p.1116, 1998.
- [31] S. J. Noh *et al.*, “Effects of notch shape on the magnetic domain wall motion in nanowires with in-plane or perpendicular magnetic anisotropy,” *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 7, p.07D123, 2012.
- [32] M. Okuda *et al.*, “Magnetic Properties of Magnetic Nanowires with Ultra-Small Trap Sites Fabricated by Anodic Oxidation and Nanoindentation Using Scanning Probe Microscopy” , *IEEE Trans. Magn.*, vol.47, no.10, pp. 2525–2527, Oct. 2011.
- [33] A. Thiaville *et al.*, “Micromagnetic understanding of current-driven domain wall motion in patterned nanowires,” *Europhys. Lett.*, vol. 69, no.6, pp. 990–996, 2005.

- [34] 「スピントロニクス基礎と材料・応用技術の最前線」、高梨弘毅 監修、シーエムシー出版社 (2009)
- [35] M. Suk *et al.*, “Verification of Thermally Induced Nanometer Actuation of Magnetic Recording Transducer to Overcome Mechanical and Magnetic Spacing Challenges” , *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 11, pp. 4350–4352, Nov. 2005.

Publications

1. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita and Naoto Hayashi, “Evaluation of Magnetic Flux Distribution from Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowires by nano-MDS Method using Contact-scanning of TMR Sensor” , Journal of Applied Physics, vol.115, no.17, pp. 17D113.1–17D113.3 (Jan. 2014).
2. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita and Naoto Hayashi, “Behavior of Multiple Magnetic Domains Motion in [Co/Pd] Nanowires by Applying One Pulse Current” , Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, vol.61, no.S1, pp. S37–40, (2014).
3. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito, Naoto Hayashi and Shigeki Nakagawa, “Detection of Current Driven Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowire by Tunneling Magnetoresistive Sensor” , Journal of Applied Physics, vol.117, no.17, pp. 17D516.1–17D516.4, (Apr. 2015).
4. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Mayumi Kawana, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito and Shigeki Nakagawa, “Operation of [Co/Pd] Nanowire Sequential Memory utilizing Bit-shift of Current-driven Magnetic Domains Recorded and Reproduced by Magnetic Head” , IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 7, 3401204, (July 2016).
5. 宮本泰敬, **奥田光伸**, 宮下英一, 「磁性細線を用いた超高速記録デバイスの研究」, 映像情報メディア学会誌, vol.68, no.1, pp. J34–J40, (2014)

International Conference Presentations

1. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita, and Naoto Hayashi, “Behavior of Accordion-like Domain Motion in [Co/Pd] Nanowires by Introducing One Weak Trap-site”, 58th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM 2013), FU-06 (Poster), Abstract p.596, (Denver, Colorado, USA / 4–8 November, 2013).
2. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito, Naoto Hayashi and Shigeki Nakagawa, “Behavior of Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowires with Periodic Battlement Shaped Notches by Nanoimprint Lithography”, 6th IEEE international Nanoelectronics Conference 2014 (IEEE INEC 2014), Session: Spin-2 INEC0164 (Oral), (Sapporo, Hokkaido, Japan / 28–31 July, 2014).
3. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito, Naoto Hayashi and Shigeki Nakagawa, “Detection of Current Driven Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowire by Tunneling Magnetoresistive Sensor”, 59th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM 2014), HT-13 (Poster), Abstract p.871, (Honolulu, Hawaii, USA / 3–7 November, 2014)
4. **Mitsunobu Okuda**, Yasuyoshi Miyamoto, Mayumi Kawana, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito and Shigeki Nakagawa, “Operation of [Co/Pd] Nanowire Sequential Memory utilizing Bit-shift of Current-driven Magnetic Domains Recorded and Reproduced by Magnetic Head” 13th Joint MMM-Intermag Conference (2016 Joint), BB-10 (Oral), Abstract p.70, (San Diego, California, USA / 11–15, January, 2016).
5. Yasuyoshi Miyamoto, **Mitsunobu Okuda**, Eiichi Miyashita, and Naoto Hayashi, “Evaluation of Magnetic Flux Distribution from Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowires by nano-MDS Method using Contact-scanning of TMR Sensor”, 58th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM 2013), DU-04 (Poster), Abstract p.394, (Denver, Colorado, USA / 4–8 November, 2013).

6. Yasuyoshi Miyamoto, **Mitsunobu Okuda**, Eiichi Miyashita, Nobuo Saito and Naoto Hayashi, “Spatial Resolution for Magnetic Domain Scope Method using Contact-scanning of TMR Sensor by Evaluating Magnetic Flux Distribution from Small Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowires” , 59th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM 2014), BQ-01 (Poster), Abstract p.174, (Honolulu, Hawaii, USA / 3-7 November, 2014)
7. Yasuyoshi Miyamoto, **Mitsunobu Okuda**, Mayumi Kawana and Nobuo Saito “Direct Recording and Imaging of Magnetic Domains in [Co/Pd] Nanowires by Magnetic Domain Scope Method using Contact-scanning of Magnetic Recording Head” 13th Joint MMM-Intermag Conference (2016 Joint), FW-04 (Poster), Abstract p.772, (San Diego, California, USA / 11-15, January, 2016).
8. Yasuyoshi Miyamoto, **Mitsunobu Okuda** and Mayumi Kawana “Direct Imaging and Detection of Fast Magnetic Domain Behavior in Nanowires by Magnetic Domain Scope Method using Contact-scanning of Magnetic Recording Head with AC Preamplifier” 61st Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM 2016), DV-02 (Poster), Abstract p.443, (New Orleans, Louisiana, USA / October 31- November 4, 2016).

Domestic Conference Presentations

1. **奥田光伸**, 宮本泰敬, 宮下英一, 斎藤信雄, 林直人, 中川茂樹, 「[Co/Pd] 磁性細線における微小溝加工による磁区駆動制御」, 2014年 映像情報メディア学会年次大会, 15-2, (大阪府吹田市 大阪大学吹田キャンパス・2014/8/31-9/2), 発表日 9/2.
2. **奥田光伸**, 宮本泰敬, 宮下英一, 斎藤信雄, 林直人, 中川茂樹, 「[Co/Pd] 磁性細線における電流駆動磁区の磁気抵抗変化による検出」, 2014年 第38回日本磁気学会学術講演会, 3aE-2, 講演予稿集 p. 176, (神奈川県横浜市 慶應義塾大学日吉キャンパス・2014/9/2-5), 発表日 9/3.
3. **奥田光伸**, 宮本泰敬, 川那真弓, 宮下英一, 斎藤信雄, 林直人, 中川茂樹, 「[Co/Pd] 磁性細線における磁区の形成・駆動・検出」, 2015年 映像情報メディア学会年次大会, 31A-1, (東京都葛飾区 東京理科大学葛飾キャンパス・2015/8/26-28), 発表日 8/28.
4. **奥田光伸**, 宮本泰敬, 川那真弓, 宮下英一, 斎藤信雄, 林直人, 中川茂樹, 「[Co/Pd] 磁性細線への磁区形成における軟磁性下地層の効果」, 2015年 第39回日本磁気学会学術講演会, 9aC-11, 講演予稿集 p. 130, (愛知県名古屋市 名古屋大学東山キャンパス・2015/9/8-11), 発表日 9/9.
5. **奥田光伸**, 宮本泰敬, 川那真弓, 宮下英一, 斎藤信雄, 「磁性細線中の磁区を利用した新しいメモリ構成: 磁気ヘッドによる磁性細線への磁区の形成・蓄積・検出」, 2016年映像情報メディア学会 マルチメディアストレージ研究会, 電子情報通信学会 磁気記録・情報ストレージ研究会, MMS2016-45, 映像情報メディア学会技術報告 p. 27, (宮城県仙台市 東北大学電気通信研究所・2016/6/9-10), 発表日 6/9.
6. **奥田光伸**, 川那真弓, 宮本泰敬「Ru を中間層に用いた[Co/Pd] 磁性細線における磁区電流駆動」, 2016年 映像情報メディア学会年次大会, , (三重県津市 三重大学・2016/8/31-9/2), 発表日 9/2.

7. **奥田光伸**, 川那真弓, 宮本泰敬「磁性細線への磁区形成における記録ヘッドー細線間距離の検討」, 2016年 第40回日本磁気学会学術講演会, 講演予稿集 p. 130, (石川県金沢市 金沢大学角間キャンパス・2016/9/5-8), 発表日 9/8.
8. 川那真弓, **奥田光伸**, 宮本泰敬, 宮下英一, 斎藤信雄, 「軟磁性層を付与した磁性細線記録媒体における磁区形成シミュレーション」, 2015年 映像情報メディア学会冬季大会, 12A-1, (東京都新宿区 早稲田大学西早稲田キャンパス・2015/12/15-16), 発表日 12/15.
9. 川那真弓, **奥田光伸**, 宮本泰敬, 宮下英一, 「磁性細線における高速磁区形成シミュレーション」, 2016年 第40回日本磁気学会学術講演会, 12A-1, (石川県金沢市 金沢大学角間キャンパス・2016/9/5-8), 発表日 9/5.

Awards Received from Academic Societies

1. 奥田光伸, 映像情報メディア学会 第49回鈴木記念奨励賞, 「[Co/Pd] 磁性細線における磁区の形成・駆動・検出」, 2016/9/1
2. 宮本泰敬, 奥田光伸, 宮下英一, 映像情報メディア学会 第21回藤尾フロンティア賞, 「磁性細線を用いた超高速記録デバイスの研究」, 2013