ウェットプロセスによる 強磁性ナノドットアレイ構造体の形成

大内 隆成*, 本間 敬之*

*早稲田大学 先進理工学部(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Fabrication of Ferromagnetic Nanodot Arrays by Wet Processes

Takanari OUCHI* and Takayuki HOMMA*

*Faculty of Science and Engineering, Waseda University (3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555)

Keywords : Electrodeposition, Electroless Deposition, Patterned Media, Magnetic Nanodots, CoPt Alloy

1. はじめに

ハードディスクドライブ(HDD)はIT基幹産業として年率ベースで二桁の成長を持續している。また、年々増加する情報量や地上デジタルハイビジョン放送、ワンセグ放送などの映像情報のストレージ技術として、更なる高容量化が要求されている。こういった需要に対し、近年の磁気記録媒体の記録密度増加は著しく、2007年には、602 Gbit/in²を超える面記録密度達成のための基本技術も発表され、1 Tbit/in²以上の超高密度記録に到達する媒体作製方法も活発に検討されている。その方法の一つとして、規則的に配列したナノスケールの強磁性体からなるビットパターン媒体(Bit patterned media : BPM)が注目されている^{1),2)}。磁気記録媒体において記録密度の向上のためには磁性粒子の微細化が必須であるが、従来からの連続膜媒体では、記録ビット境界の乱雑さに起因するノイズが生じ、高記録密度化が進むにつれ、その影響が大きくなることが知られている。これに対し、BPMは隣接する記録ビットが物理的に分離しているため、原理的にビット転移点でのノイズは生じず、1ビットを磁性粒子の熱安定限界近くまで微細化することが可能である。記録密度としては、磁性体を正方格子状に25 nm周期で配列させた場合が1 Tbit/in²に相当する³⁾。磁性結晶体は一定体積以下になると、磁化方向を保つエネルギー $K_u V$ (K_u : 結晶磁気異方性エネルギー, V : 磁性体体積)が熱エネルギー $k_B T$ (k_B ; ボルツマン定数, T ; 温度)を下回るため、熱的な磁気モーメントの揺らぎに起因する磁化の不安定が増し、記録ビットが減衰、消失してしまう現象が生じる。したがって、1 Tbit/in²もしくはそれ以上の記録密度を達成するBPMの磁性材料としてはFePt, CoPt, Co₃Pt, SmCo₅などの高 $K_u V$ を有する材料が有力である。これらの磁性体は現在記録材料として主流に用いられているコバルトクロム(CoCr)系合金の数十倍の $K_u V$ を有する⁴⁾。

本稿では、さまざまなBPM作製手法および周辺の微細加

工技術について、我々が研究しているウェットプロセスを用いた手法も含めてこれまでの研究例を紹介する。

2. BPM作製手法

BPM作製手法は二種類のアプローチに大別される。一つはあらかじめスパッタリング法等の乾式法により形成した磁性膜を加工する手法、もう一つは微細孔を有する基板に磁性体を形成する手法である。いずれの手法においても、加工にはリソグラフィ技術が用いられている。BPM作製におけるリソグラフィ手法としては、電子線リソグラフィ(Electron Beam Lithography : EBL)、集束イオンビーム(Focused Ion Beam : FIB)ミリング、レーザー干渉リソグラフィ(Laser Interference Lithography : LIL)、およびブロックコポリマー、ナノインプリントリソグラフィ(Nanoimprint Lithography : NIL)などを用いた手法が報告されている。以下にそれぞれの手法について述べる。

2.1 EBL

EBLは基板表面にEB感光樹脂を塗布し、所望のパターンを電子線(Electron Beam : EB)により直接描画することで、マスクレスでパターンを形成する手法である。本手法は数〜数十 nmの超微細パターンの形成が可能であり、BPM作製手法として利用されてきた。Dialらはポジ型レジストのPolymethylmethacrylate(PMMA)を用いて、25 nm周期に配列したナノホールパターンの作製に成功している⁵⁾。また、ネガ型レジストとしては、藤田らが開発したTEBN-1(Calixarene, トクヤマ)^{6)~8)}が高解像度を実現しており、保坂らはCalixareneを用いて、反応性イオンエッチング(RIE)と組み合わせることで、25 nm周期、面密度にして1 Tbit/in²に相当するSiナノピラーアレイを作製している⁹⁾。さらに、Yangらは、ポジ型レジストZEP 520(日本ゼオン)で18 nm周期、面密度約2 Tbit/in²に相当するナノホールアレイを形成し、同時にネガ型レジストHSQ(Hydrogen Silsesquioxane, Dow Corning Co.)を用いて、4.5 Tbit/in²

の面密度の相当するナノピラーアレイの形成に成功している¹⁰⁾。

また、EBLを用いて実際に磁性体ナノドットアレイを作製した例として、Kraussらの50nm径、100nm周期のNiナノドットアレイの作製¹¹⁾や、青山のCoPt/Pt膜に対しEBLとリフトオフを用いたCoPtドットピラーアレイ/Pt構造の形成などがあげられる^{12),13)}。

本手法は解像度においては、上述のように1Tbit/in²を大きく超え、テラビット級の記録密度を有するBPM作製手法として十分な能力があると考えられるが、量産性において問題があることから、研究レベルでの使用、もしくは後ほど述べるナノインプリントモールド作製手法としての適用が期待される。

2. 2 イオン照射

スパッタリング法等の乾式法により作製した磁性膜に対し、マスクを付与してイオン照射をすることにより、イオン照射された部分の磁気異方性を非破壊的に減衰・消失させる手法がある。磁気記録媒体の作製において表面の平坦化は重要であり研究者を悩ませる点である。それに対し本手法は、非破壊的なパターン形成が可能であり有用である。本手法を用いた例として、スパッタリングにより作製した高垂直磁気異方性を有するPt-Co-Ptサンドイッチ構造、もしくは(Pt-Co)_n-Pt多層膜に対し、He⁺イオンを照射し、表面のラフネスに影響を与えず垂直磁気異方性を減少させたという報告例がある¹⁴⁾。

しかしながら、イオン照射は、照射するイオンの種類、照射エネルギー、照射量により、衝突エネルギーによる結晶構造の破壊、異物としての混入することによる結晶構造の変化、FIBに代表されるエッチングなど磁性膜に与える影響が異なる。

2. 3 FIB ミリング

イオンを加速した高エネルギーのイオンビームにより試料表面を機械的に削り取り所望のパターンを形成する手法をFIBミリングという。Rettnerらは5nmのカーボンコーティングを施したCo₇₀Cr₁₈Pt₁₂のグラニュー膜(膜厚20nm)に対し、Ga⁺イオンを用いて正方格子状に深さ6nmの溝を掘ることにより140Gbit/in²の面記録密度に相当するパターン形成を行った¹⁵⁾。照射されたGa⁺イオンはカーボンコーティングを削りとった後、さらに磁性層をわずかに削る。その際、Ga⁺イオンは試料表面を削るだけではなく磁性層に注入され、上述のように、磁性層内に組成変化や衝突エネルギーによる結晶構造の変化を局所的に引き起こし、垂直磁気異方性の低減および記録ビットの分断を誘起している。

本プロセスの優位性は所望のパターンをマスクレスで直接

描画できる点であるが、EBLと同様に量産性の面で問題がある。

2. 4 LIL

LILはレジストを塗布した基板に対し、二本のレーザービームを斜めに入射し、干渉によりパターンを形成する手法である。レーザー干渉により形成されるパターンの周期Pは、 $P = \lambda / (2 \sin \theta)$ で示され(λ :入射ビーム波長、 θ :二本のレーザービーム間の角度の1/2)、パターンエリアはレーザーのビーム径で決定される。約266nmの光源で、150nm-500nm周期のパターンが形成可能である。

本手法は位置合わせを必要とせず、簡便にナノサイズのパターンの形成が可能であり、量産性に比較的優れている¹⁶⁾。そのため近年ではBPM作製手法として検討が進められている^{17),18)}。三塚らはLILを用いてCoPt/Ru薄膜を加工し、80-245nm径、600nm周期のドットアレイを形成し、その磁化反転機構の解析を行った^{19),20)}。また、LILの広範囲への一括形成性を用いて、後述するナノインプリントリソグラフィに用いるモールド作製を行ったという報告もある²¹⁾。

2. 5 NIL

NILは、1995年に現プリンストン大学のStephen Y. Chou教授が提唱した技術である²²⁾。電子線描画により形成したナノオーダーのパターンを有するモールドを、基板上に塗布したポリマーに押し当てポリマーを変形し、モールド離形後残膜をO₂アッシングにより除去することで微細パターンを形成する。簡単なプロセスフローを図1に示す。

フォトリソグラフィでは数十nmオーダーのパターンの形成において、短波長化にともなう露光機の高騰や、微細化にともなうマスクの高騰が問題となっていた。それに対し、ナノインプリントリソグラフィでは、EB描画により作製したモールドを繰り返し使用することで、比較的安価にナノオーダーのパターンを一括形成することが可能となる。また、本手法の解像度はモールド作製精度によって決まるが、Chouらは検討により、10nm以下の転写が可能であることを示していることから^{23),24)}、BPMにおけるパターン形成方法として注目されている^{25),26)}。

2. 6 ブロックコポリマーを用いたリソグラフィ

ブロックコポリマーは親水性、疎水性それぞれの性質を有する2つの異なるポリマー鎖をナノスケールで結合したもので、相分離によりドットを形成する。このドットは形状および大きさが一様で、広範囲に一括形成が可能であるため、BPM作製への利用が検討されている。

内藤らはジブロックコポリマーを用いたAASA法(Artificially assisted self-assembling method)でディスク基板上にナノドットアレイをトラック状に形成することに成功し

図1 NILのプロセスフロー

た^{27)~30)}。ディスク基板上に CoCrPt グラニュラ膜を成膜し、レジストを塗布後 Ni モールドによりトラック状の溝を形成する。その後そのトラック内にジブロックコポリマー (PS : Polystyrene と PMMA の共重合体) を塗布し、アニールすることで自己組織的に PS に囲まれた PMMA ドット構造を形成する。O₂ アッシングにより PMMA ドットを選択的に除去し、PMMA ドットが除去された位置に SOG (Spin on Glass) が流れこむように塗布する。最後に SOG をマスクとして Ar⁺ イオンミリングにより磁性膜をエッチングする。すると SOG ドット部の下の磁性層のみが残り、CoCrPt ナノドットピラーアレイを形成する。この手法では、PMMA ドットは、あらかじめナノインプリントで形成したトラックに沿って形成される。したがって、CoCrPt ナノドットアレイもトラック状に等間隔に形成されることになる。この手法でドット径 40 nm、ドット周期 80 nm のナノドットアレイをトラック状に作製している。しかしながら、この手法は偏析した CoCrPt 膜に対しドット形状をパターンニングする手法であるため、一つのドット内に CoCrPt の粒界がランダムに含まれることになる。さらにエッチングにより形成する形状も一様ではないことから、ドットごとの磁気特性の揺らぎが顕在化しており、改善が求められる。

2. 7 FePt ナノ粒子

Sun らが分散性よく合成し基板上に塗布した FePt ナノ粒子を発表³¹⁾して以来、1 Tbit/in² もしくはそれ以上の磁気記録媒体作製を達成する新しい磁性体として注目されている。Sun らは、Fe(CO)₅ の熱分解と Pt(acac)₂ のポリオール還元を併用し、約 300°C で還流することで粒子径 4 nm の Fe₅₂Pt₄₈ ナノ粒子を合成した。その後約 560°C で 30 分アニールすることで Fcc 構造から高磁気異方性を有する Fct 構造へと相転移させた。しかし、560°C という高温でのアニール処理は PMR に必要な軟磁性裏打ち層を始めとする下地層の偏性や、製造コストなどの問題がある。したがって、低温で L1₀ 構造を有する FePt ナノ粒子の合成する方法が研究されている。

3. ウェットプロセスを用いた強磁性ナノドットアレイの作製

我々はウェットプロセスのもつ高速・精密形成性や大面積への均一形成性といった面に着目し、これを活かしたパターン媒体の作製を試みてきた。電気化学的手法を用いたパターン媒体の作製については、首都大学東京の益田教授のグループが、Al 膜に陽極酸化法により規則配列したポーラスを形成し³²⁾、Co を始めとする強磁性体金属を充填する研究を報告している³³⁾。さらに他にもポーラスアルミナを鋳型に、高

い垂直磁気異方性を有する CoPt, FePt ドットアレイの作製が報告されている^{34),35)}。

一方我々は、EBL で形成したナノパターンに対し、アニール処理なしで高い垂直磁気異方性を有する強磁性ナノドットアレイを電気化学的手法で形成する研究を行ってきた。磁性材料としては無電解析出 CoNiP、および電解析出 Co₈₀Pt₂₀ を選び、それぞれ磁気特性の制御や、微細孔への均一充填のための析出条件の最適化を進めてきた³⁶⁾。無電解 CoNiP は単純な浴組成でかつ温和な条件下で成膜可能であり、過去の研究で、最大で垂直方向保磁力 2600 Oe を有する CoNiP 薄膜の作製に成功している^{37),38)}。また、電解析出 Co₈₀Pt₂₀ は、I. Zana らが電解析出法により、hcp 構造を有し c 軸が基板に垂直に配向しやすい Co₈₀Pt₂₀ 薄膜の作製を報告している³⁹⁾。

さらに、EBL における量産性の問題を考慮し、NIL を用いて形成したパターンに対し CoPt を充填し、広範囲にわたり均一に CoPt ナノドットアレイを作製する検討を試みている。まず光硬化性樹脂をレジストとした UV-NIL 法を適用し、パターン形成および磁性体の埋め込みを行った。レジストには形成精度はもとより、機械的な強度も求められることから、シリカ系素材に有機成分を分子レベルで複合化させて特性を最適化した Organic-SOG を用いた検討を進めている。

あわせて、解像度の面で優れている EBL により超微細パターンを形成し、ウェットプロセスのナノドットアレイ形成密度限界を探索している。その検討の一つとして、パターン形成プロセスの更なる高分解能化を実現するため、自己組織化有機単分子膜の EBL 用レジストへの適用を紹介する。

3. 1 無電解 CoNiP ナノドットアレイの作製

N 型 Si(100) 基板に熱酸化により SiO₂ 層を付与し、EB レジストをスピコートにより塗布した。EB 描画装置により等間隔にドット状のナノパターンを配列形成し、その後反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching : RIE) により SiO₂ 層にパターンを転写した。こうして SiO₂ 層に形成したナノパターンに対し、無電解析出法により CoNiP を充填し、過剰析出部を化学機械研磨 (CMP) により平坦化することで、ナノドットアレイを作製した。EBL を用いた本プロセスのプロセスフローを図 2 に示す。

図 3 に示す CoNiP 充填前後の SEM 像からドット径 200 nm、ドット高さ 500 nm の CoNiP のナノパターンへの選択的充填が確認された。しかし、本手法では、ドット径 100 nm 以下のドットに対し、無電解析出反応が進行しないという問題が生じた。図 4 (a), (b) にドット径 100 nm のパターンを形成した基板を CoNiP めっき浴に浸漬した際の SEM 像を示す。図 4 (a), (b) では CoNiP の析出がまったく観察

図2 EBLを用いた CoNiP ナノドットアレイ作製のプロセスフロー

されなかつただけではなく、図4(b)において逆ピラミッド構造のSiの過剰エッチング部が観察された。これは高pHの浴により異方性エッチングが進行したためと考えられる。そこでめっきの前処理としてPdイオンを含む溶液に浸漬したところ、図4(c)、(d)に示すようにドット径100nmのドット内にCoNiPが欠陥なく充填された。図4(c)、(d)ではSi層のエッチングは進行せず、CoNiPの充填が観察された。これらの結果から、ナノパターンに対するCoNiPの無電解析出反応はPd触媒化処理により活性化され、100nm径のパターン内への充填が可能となると考えられる。また、CoNiPの析出反応はナノパターンのみに選択的に進行していることから、Pdによる無電解析出反応の活性化はドット底部のSi表面のみで起こり、SiO₂上への析出反応は進行していないことがわかる。これは、PdがSi表面に優先的に吸着すること、およびSi表面でのみ置換反応が進行することによると考えられる。

次に、このように作製したCoNiPナノドットアレイの磁気特性の評価を試みた。図5(a)-(c)に示すのは、それぞれCoNiP薄膜のDC磁化後のMFM像、270nm径、450nm周期のCoNiPナノドットアレイのDC磁化後のMFM像、および270nm径、450nm周期のCoNiPナノドットアレイのAC消磁後のMFM像である。図5(a)に示すCoNiP薄膜は島状磁区構造が観察されているのに対し、図5(b)では全て同一方向に磁化されたCoNiPナノドットアレイが観察された。これはドット形状が高アスペクト比であることに起因する形状磁気異方性に依るものであると考えられる。しかし、図5(c)から一ドット内に逆磁区が観察されたことから、

図3 CoNiPの充填前後の基板表面のSEM像；(a)充填前、(b)充填後。ドット径200nm、ドット高さ500nm。

充填するCoNiPの磁気特性のさらなる改善が必要となる。図5(d)に示すのは100nm径のCoNiPナノドットアレイのDC磁化後のMFM像である。図5(d)は図5(b)に比べると明瞭な磁区構造が観察されたが、計測中に容易に減衰、消失、変動してしまう。これは充填したCoNiP合金の熱安定性による影響であると考えられる。

CoNiP薄膜の保磁力は800 Oe、角型比は0.15であったが、それに対し、アスペクト比2.5(ドット径200nm、ドット周期500nm)のドットにおいては、保磁力460 Oe、角型比0.44が観察された。

3. 2 CoPtナノドットアレイの作製

我々は、I. Zanaらの提案した浴組成および電析条件³⁹⁾を改良した電析条件および浴組成を用いて、SiO₂上にEBLにより形成したナノパターンにCoPtを充填した。

図6に示すのは、EBLによりSiO₂層に形成したドット径

図4 CoNiP無電解めっき浴浸漬後の基板のSEM像；(a)、(c)上面図、(b)、(d)断面図。(a)、(b)はPd活性化処理を施さなかった場合、(c)、(d)はPd活性化処理を施した場合。ドット径100nm、ドット高さ500nm。

図5 (a)CoNiP薄膜のDC磁化後のMFM像、(b)270nm径、450nm高さのCoNiPナノドットアレイのDC磁化後のMFM像、(c)270nm径、450nm高さのCoNiPナノドットアレイのAC消磁後のMFM像、(d)100nm径のCoNiPナノドットアレイのDC磁化後のMFM像。

100 nm, ドット周期 750 nm のナノパターンに対し, CoPt を電析したのち CMP により研磨した際の SEM 像である。図 6 より欠陥のない位置選択的な CoPt の充填が観察された。Pd 処理などの前処理なしに 100 nm 径のパターンに対し欠陥のない充填が可能となることから, 電気めっきによる CoPt の充填は無電解めっきによる CoNiP の充填に比べ, 容易に微細なドットの作製が可能である。また, こうして作製した CoPt ナノドットアレイの磁気特性を評価したところ, 保磁力 1500 Oe, 角型比 0.55 であった。

さらに, 図 7 は同サンプルを DC 磁化した際の MFM 像である。先ほど述べた無電解析出法により作製した CoNiP ナノドットアレイは, ドット径 100 nm では熱不安定性から MFM 観察が困難であったのに対し, 図 7 ではドットごとに明瞭な単磁区構造が観察された。

これらの結果が示すように CoPt は CoNiP に比べ高い磁気特性を示している。これは, CoPt が高い垂直磁気異方性を有し, 熱安定性が高いことによると考えられる。

我々はさらに小さなナノパターン形成を試み CoPt の充填を行った結果, ドット径 35 nm, ドット周期 50 nm のパターンに対し, CoPt を充填することに成功している。このとき作製したドットアレイは面記録密度として 250 Gbit/in² に相当する。現在さらなる微細パターンに対する CoPt の充填について検討を進めている。

3. 3 UV-NIL を用いた CoPt ナノドットアレイの作製

UV-NIL とは, 基板上に塗布した光硬化性樹脂に対し石英モールドを押し当て, UV 照射することで樹脂を硬化させパターン形成する方法である。石英モールドを使用するためアライメント精度が高いこと, 光硬化性樹脂は低粘度であるため低加圧での形成が可能であり下地層の偏性の懸念が少な

いことなどが有用な点である。さらには磁性層を薄く成膜することが求められる垂直磁気記録媒体において, 低粘度であるためスピコートにより薄く均一に成膜することができることも魅力的な点である。

我々は, N 型 Si(100) 基板にスパッタリングにより Cu と Cr を下地層として成膜し, Cu(20 nm)/Cr(5 nm)/n-Si の層構造を形成した。その基板に対し, 光硬化性樹脂を塗布後 UV-NIL により図 8 に示すプロセスフローで CoPt ナノドットアレイを作製した。

その結果これまでに, ドット径 70 nm, ドット周期 100 nm, 65 Gbit/in² の面記録密度に相当する CoPt ナノドットアレイの作製に成功している。

同時に我々は UV-NIL に比べ機械的, 化学的耐性の高い, Spin on Glass(SOG)をレジストとして用いた NIL⁴⁰⁾により形成したナノパターンに対し, CoPt を充填する検討を行っている。N 型 Si(100)に SOG を塗布し, Si モールドを用いて SOG 上に押し込みナノパターンを形成した。CoPt を電析後, CMP 処理し, ドット径 200 nm, ドット周期 325 nm の CoPt ナノドットアレイの作製に成功した。

上述のように, 磁気記録媒体の高密度化の研究は盛んであり, 従来技術を活かしながらさらなる高密度化を実現することができるハイスループットな技術の導入が求められている。したがって, ここで紹介した NIL とウェットプロセスを組み合わせた手法の実現が期待される。

3. 4 自己組織化単分子膜(SAM)を用いた EBL によるパターンニング

EBL プロセスにより微細なドットパターンを形成するには, EB 描画装置のビーム径や加速電圧, EB レジストの解像度が鍵となる。そこで我々は自己組織化単分子膜(SAM)をレジストとして適用し, EB 描画により局所的に SAM を

図 6 EBL により形成した CoPt ナノドットアレイの SEM 像; (a)上面図, (b)断面図。ドット径 100 nm, ドット周期 750 nm。

図 7 CoPt ナノドットアレイの DC 磁化後の MFM 像。ドット径 100 nm, ドット周期 750 nm。

図 8 UV-NIL を用いた CoPt ナノドットアレイの作製のプロセスフロー

図9 ODMSをレジストとしてEBLを行った際のLFM像,
2.5 fC dot⁻¹ (shot mode, 25 kV, 50 pA)

除去しパターンニングする手法を検討している⁴¹⁾。本手法では、nmスケールで均一な厚みの膜を、極めて簡便かつ精密に形成可能であり、また電子線照射による分子の局所的な脱離によりパターンニングが可能である。その分解能は描画装置の性能にも依存するが、原理的には装置のビーム径の限界まで微小で、位置制御の限界まで高密度なパターンニングが可能となることが期待される。

N型Si(100)に熱酸化によりSiO₂層を付与し、オクタデシルトリメトキシシラン(ODMS)を成膜後、EBLにより局所的にODMSを除去した。

図9に示すのはODMSを成膜し、EB描画によりパターンニング後の水平力顕微鏡(LFM)像である。図9に示す明るい点はODMSがEB描画により除去され、SiO₂層がむき出しとなっている部分である。図9に示すようにEBLにおいてSAMをレジストとして20 nm径のパターンニングが可能となった。

4. おわりに

磁気記録媒体の高密度化への要求は高まり、2 Tbit/in²という数値目標が掲げられるようになったが、磁気記録媒体の生産においては、従来技術を活かしながら更なる高密度化を実現するハイスループットな技術の導入が求められている。したがって、本報告において述べた中でも特にNILを利用して形成したナノパターンを用いた手法が期待される。

ウェットプロセスはドライプロセスに比べ高速一括形成性に有利である反面、結晶構造の制御は困難である。しかし原子、分子レベルから反応プロセス系を利用した際の結晶制御性、均一形成性、精密形成性はドライプロセスを凌ぐものである。したがって、均一な結晶性を有するナノ構造体を一括形成することが求められる磁気記録媒体の作製においてその研究が求められている。また、そのようなナノ構造体作製技術は磁気記録媒体作製技術のみに留まらず、ULSI配線作製技術をはじめ、エレクトロニクス分野で多く利用されると考えられる。

(2008-4-17 受理)

文 献

- 1) R. L. White, R. M. H. New and R. F. W. Pease; *IEEE Trans. Magn.*, **33**, (1), 990 (1997).
- 2) H. J. Richter, A. Y. Dobin, R. T. Lynch, D. Weller, R. M. Brockie, O. Heinonen, K. Z. Gao, and J. Xue, R. J. M. v. d. Veerdonk, P. Asselin and M. F. Erden; *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 222512 (2006).
- 3) C. A. Ross, H. I. Smith, T. Savas, M. Schattenburg, M. Farhoud, M. Hwang, M. Walsh, M. C. Abraham and R. J. Ram; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **17**, 3168 (1999).
- 4) D. Weller and A. Moser; *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 4423 (1999).
- 5) O. Dial, C. C. Cheng and A. Acherer; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 3387 (1998).
- 6) J. Fujita, Y. Ohnishi, Y. Ochiai and S. Matsui; *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1297 (1996).
- 7) J. Fujita, Y. Ohnishi, S. Manako, Y. Ochiai, E. Nomura, T. Sakamoto and S. Matsui; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** 7769 (1997).
- 8) M. Ishida, J. Fujita, T. Ogura, Y. Ochiai, E. Ohshima and J. Momoda; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 3913 (2003).
- 9) S. Hosaka, H. Sano, M. Shirai and H. Sone; *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 223131 (2006).
- 10) X. Yang, A. Xiao, W. Wu, Y. Xu, K. Mountfield, R. Rpttmayer, K. Lee, D. Kuo and D. Weller; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **25**, 2202 (2007).
- 11) P. R. Krauss and S. Y. Chou; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **13**, 2850 (1995).
- 12) T. Aoyama, K. Uchiyama, T. Kagotani, K. Hattori, Y. Wada, S. Okawa, H. Hatate, H. Nishio and I. Sato; *IEEE Trans. Magn.*, **37**, (4), 1646 (2001).
- 13) T. Aoyama, S. Okawa, K. Hattori, H. Hatate, Y. Wada, K. Uchiyama, T. Kagotani, H. Nishio and I. Sato; *J. Magn. Mater.*, **235**, 174 (2001).
- 14) C. Chappert, H. Bernas, J. Ferré, V. Kottler, J.-P. Jamet, Y. Chen, E. Cambril, T. Devolder, F. Rousseaux, V. Mathet and H. Launois; *Science*, **280**, 1919 (1998).
- 15) C. T. Rettner, M. E. Best and B. D. Terris; *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 1649 (2001).
- 16) Spallas JP, Boyd RD, Britten JA, Fernandez A, Hawryluk AM, Perry MD and Kania DR; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 2005 (1996).
- 17) M. Zheng, M. Yu, Y. Liu, R. Skomski, S. H. Liou, D. J. Sellmyer, V. N. Petryakov, Y. K. Verevkin, N. I. Polushkin and N. N. Salashchenko; *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2606 (2001).
- 18) R. Murillo, H. A. van Wolferen, L. Abelmann and J.C. Lodder; *Microelectronic Engineering*, **78-79**, 260-265 (2005).
- 19) N. Kikuchi, R. Murillo, J. C. Lodder, K. Mitsuzuka and T. Shimatsu; *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3613 (2005).
- 20) K. Mitsuzuka, N. Kikuchi, T. Shimatsu, O. Kitakami, H. Aoi, H. Muraoka and J. C. Lodder; *IEEE Trans. Magn.*, **42**, 3883 (2006).
- 21) W. Wu, B. Cui, X. Sun, W. Zhang, L. Zhuang, L. Kong and S. Y. Chou; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16** 3825 (1998).
- 22) S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom; *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114 (1995).
- 23) S. Y. Chou, P. R. Krauss and P. J. Renstrom; *Science*, **272**, 85 (1996).
- 24) S. Y. Chou, P. R. Krauss, W. Zhang, L. Guo and L.

- Zhuang ; *J. Vac. Sci. Technol. B* **15**, 2897 (1997).
- 25) S. Y. Chou, P. R. Krauss and L. Kong ; *J. Appl. Phys.*, **79** 6102 (1996).
- 26) B. Cui, W. Wu, L. Kong, X. Sun and S. Y. Chou ; *J. Appl. Phys.*, **85**, 5534 (1999).
- 27) K. Naito, H. Hieda, M. Sakurai, Y. Kamata and K. Arakawa ; *IEEE Trans. Magn.*, **38**, (5), 1949 (2002).
- 28) Y. Kamata, A. Kikitsu, H. Hieda, M. Sakurai and K. Naito ; *J. Appl. Phys.*, **95**, (11), 6705 (2004).
- 29) K. Naito ; *CHAOS*, **15**, 047507 (2005).
- 30) Y. Kamata, A. Kikitsu, H. Hieda, M. Sakurai, K. Naito, J. Bai and S. Ishio ; *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 999 (2007).
- 31) S. Sun, C. B. Murray, D. Weller, L. Folks and A. Moser ; *Science*, **287**, 1989 (2000).
- 32) H. Masuda and K. Fukuda ; *Science*, **268**, 1466 (1995).
- 33) K. Yasui, T. Morikawa, K. Nishio and H. Masuda ; *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**, 15, L 469-L 471 (2005).
- 34) N. Yasui, A. Imada and T. Den ; *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3347 (2003).
- 35) Y. H. Huang, H. Okumura, G. C. Hadjipanayis and D. Weller ; *J. Appl. Phys.*, **91**, 6869 (2002).
- 36) J. Kawaji, F. Kitaizumi, H. Oikawa, D. Niwa, T. Homma and T. Osaka ; *J. Magn. Magn. Mater.*, **287**, 245 (2005).
- 37) T. Homma, K. Inoue, H. Asai, K. Ohnishi and T. Osaka ; *IEEE Trans. Magn.*, **27**, 4909 (1991).
- 38) K. Itakura, T. Homma and T. Osaka ; *Electrochim. Acta.*, **44**, 3707 (1999).
- 39) I. Zana and G. Zangari ; *Electrochem Solid-State Lett.*, **6**, C 153 (2003).
- 40) S. Matsui, Y. Igaku and H. Ishigaki ; J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, M. Komuro and H. Hiroshima ; *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, 2801 (2001).
- 41) D. Niwa, K. Omichi, N. Motohashi, T. Homma and T. Osaka ; *Chem. Lett.*, **33**, 176 (2004).
- ~~~~~