

ハイブリッド・超解像メモリ技術
東京農工大学大学院 ナノ未来科学研究拠点
佐藤勝昭

Magneto-optical Hybrid and Super-resolution Storage
Technology

Katsuaki Sato

Tokyo University of Agriculture and Technology
Strategic Research Initiative for Future Nano-Science and
Technology

First recent trends and problems in increasing density of the magnetic storage are reviewed. Next, basic concepts of heat-assisted magnetic recording technology are discussed. Finally use of super-resolution and magnetic domain expansion techniques are also introduced.

1. はじめに

大容量高密度ストレージ技術として常に光メモリと比較されるのが磁気記録、とりわけハードディスクの技術である。ハードディスクには、過去に何度となく記録密度の限界が指摘されたが、そのたびに新しい技術が出現して、その限界を超えてしまうという歴史が繰り返されてきた。数年前まで、長手記録の記録密度には超常磁性限界が 40 Gb/in^2 付近にあるとされていたが、層構造を改善して安定化した媒体の採用によりこの限界を軽く突破し、2002年には実験室レベルで 100 Gb/in^2 を超える面記録密度を達成してしまった。最近の報告によれば、新しい媒体を用いた実験室レベルでの面内記録の線記録密度は、 800 kFCI ($\text{FCI}=\text{flux change per inch}$) に達している。この線密度は面記録密度に換算すると、記録マークのアスペクト比 1:2 として、 320 Gb/in^2 に相当する。

それでは、磁気記録密度はこの延長でどこまでも増大するのであろうか。 1 Tb/in^2 を超えるには、マークサイズは $25 \text{ nm} \times 25 \text{ nm}$ にまで縮小しなければならず、熱的安定性を保証するには大きな保磁力をもたせなければならないが、それでは、ヘッドによる記録が困難になる。これを解決する方法として提案されているのが、熱アシスト記録、または、ハイブリッド記録と呼ばれる技術である。これは、MO ディスクと同じように磁気記録の際にレーザによる加熱を使って保磁力を下げた状態で記録する。記録の

際、光を狭い領域に集中させる技術として、近接場技術が使われようとしている。一方、再生において GMR ヘッドを使う方法には限界があるので、光磁気媒体の特性を利用して GMR ヘッド再生に熱アシストする方法、磁気誘起超解像技術と磁区拡大、または、磁壁移動を援用して信号の増幅を図る磁気光学再生、さらには、近接場光ヘッドを用いた近接場光再生などが検討されている。

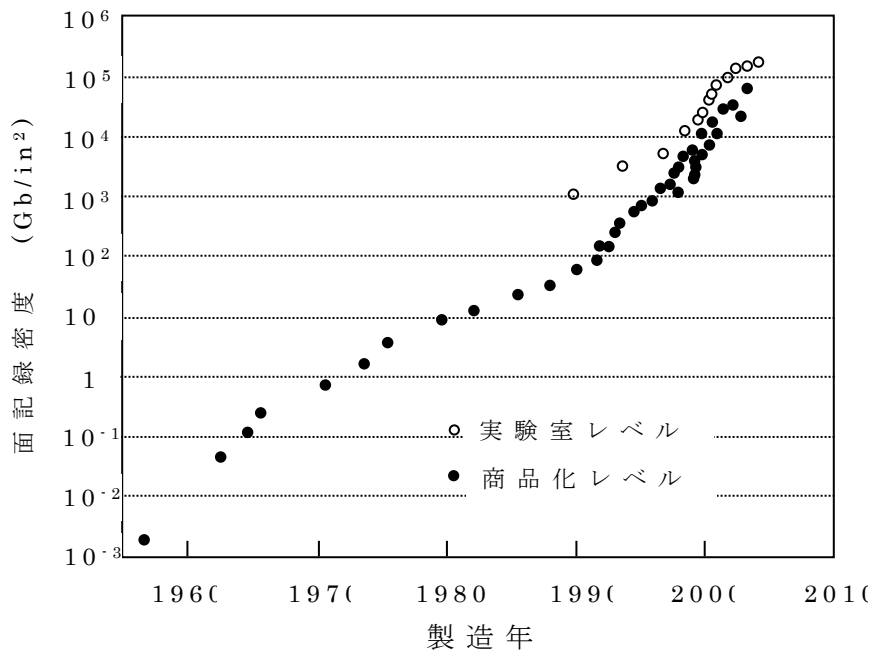


図 1 ハードディスクの面記録密度の変遷

2. 磁気記録の限界

ハードディスクの面記録密度の増大には目を見張るものがある。図 1 はハードディスクの面記録密度の変遷を示したものである¹。1992 年までは年率 25% の増加率 (10 年で 10 倍) であったが、1992 年にはそれまでの誘導型磁気ヘッドに代わり電気抵抗率の磁気による変化を用いた MR (magneto-resistance) ヘッドが導入されたことにより年率 60% (10 年で 100 倍) の増加率に転じた。さらに、1997 年からは磁性体と非磁性体の超薄膜の積層構造を用いた GMR (giant magneto-resistance) ヘッドの登場によって年率 100% (10 年で 1000 倍) の増加率となった。この増加率

はどこまでも続くものであろうか。

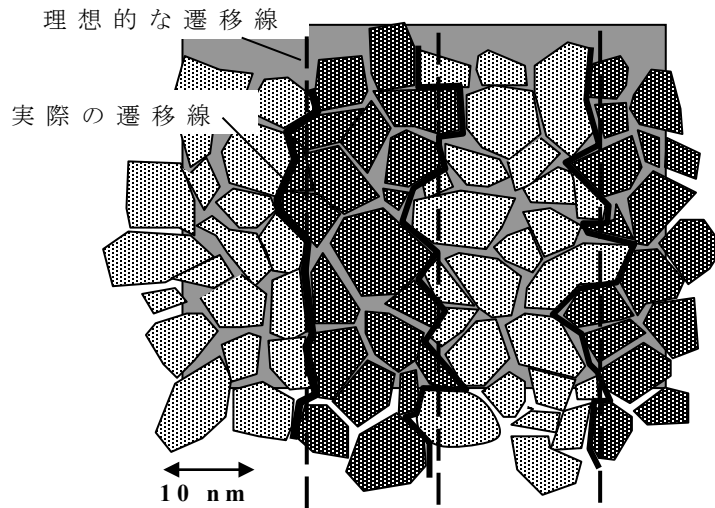


図 2 多結晶記録媒体の記録磁区と磁壁

現在使われているハードディスク媒体は図 2 に示すように直径数 nm の CoCr 系強磁性合金の結晶粒が、粒界に偏析した Cr 粒に囲まれ、互いに分離した多結晶媒体となっている。微粒子のサイズが小さくなっていくと、磁気ヘッドによって記録された直後は、記録磁区内のすべての粒子の磁化が記録磁界の方向に向いているが、時間とともに各粒の磁化がバラバラな方向に向いていき、記録された情報が保てないという現象が起きてくる。この現象が起きるのは、粒子の異方性磁気エネルギー KuV (Ku は単位体積あたりの磁気異方性エネルギー、 V は粒子の体積) が小さくなったことによって、熱揺らぎ kT に打ち勝てなくなるためである。この現象は強磁性粒子がランダム配向するので、超常磁性と呼んでいる。実際、20 Gb/in² の記録媒体では、その平均の粒径は 10 nm 程度となり、各結晶粒は磁氣的に独立に挙動し、記録された情報が保てない。一例として 16 Gb/in² の記録媒体において信号強度が $t=10^4$ s で 96% に低下することが報告されている²。

ハードディスクの寿命の範囲でデータが安定であるための条件は、 $\eta=KuV/kT$ というパラメータが 60 以上なければならないとされている。粒径 d が小さくなると、記録される粒子の体積 V はほぼ d^3 に比例して小さくなる。この減少を補うだけ、磁気異方性 Ku を増大できれば、

超常磁性限界を伸ばすことができる³。保磁力 H_c は $H_c=2Ku/Ms$ と書かれるから Ku を増大すると保磁力が増大し、ヘッド磁界が高くなりすぎて記録できなくなる。

かつて、超常磁性限界は、 40Gbits/in^2 とされていたが、AFC(反強磁性結合)媒体の登場で、これをクリアした⁴。AFC 媒体というのは、Ru の超薄膜を介して反強磁性的に結合させた媒体のことで、交換結合によって見掛けの V を増大させて、安定化を図るものである。これにより実験室レベルの面記録密度は 150Gb/in^2 まで達した。しかし記録密度が 150Gb/in^2 に達した前後から、長手記録での高密度化の進展に急速に限界が見え始めてきた。

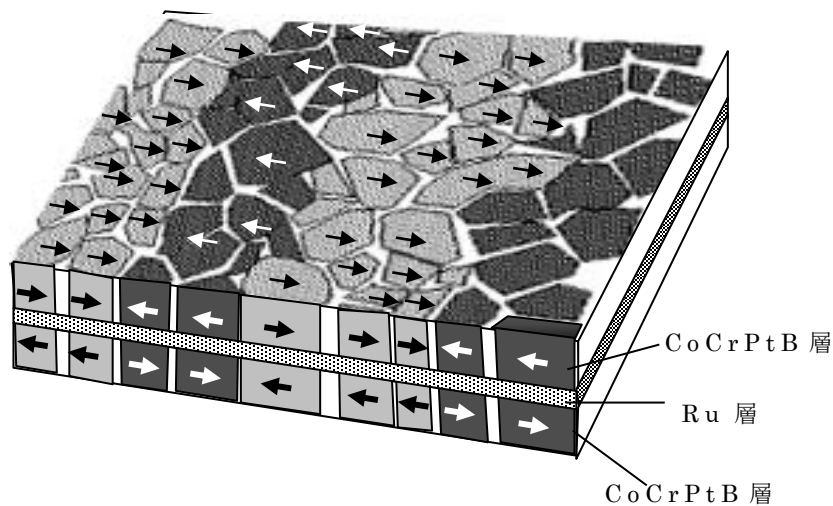


図 3 反強磁性結合媒体

これを救う技術として、長らく研究されてきた垂直磁気記録技術が商品化されようとしている。2003 年春の時点ですでに 169Gb/in^2 が実証されており、研究開発の段階を終えて、既に量産化の検討も始めているという⁵。

しかし、垂直磁気記録によって超常磁性限界の到来を多少遅らせることはできても、せいぜい 500Gb/in^2 までであろうと考えられている。保磁力を大きくすれば安定性が向上することは確実であるが、ヘッドでの記録能力の問題を提起する。ヘッドの飽和磁束密度には限界があるし、ヘッドの寸法の縮小にも限界がある。現行の磁気ヘッドは理論限界の $1/2$ 程度のところにまで到達しており、改善の余地はほとんど残されていない。

3. 光磁気ハイブリッド記録

保磁力 H_c の大きな媒体にどのようにして記録するかという課題への回答が熱を使うことである。室温付近では大きな H_c を示すが温度上昇によって通常の磁気ヘッドで記録できる程度に H_c が減少する媒体を用いて、温度を上げて磁気記録し、再生は GMR 磁気ヘッドを用いるのが光磁気ハイブリッド記録の考えである。

熱を用いた磁気記録技術は珍しいものではなく、光磁気 (MO) ディスク技術としてすでに確立した技術である。実際に市販されているミニディスク (MD) では、アモルファス TbFeCo 材料を用いてキュリー点記録を行っている。記録時の温度は 250°C くらい、記録用磁界はたったの 200 Oe (1.6 kA/m) であるが、室温での H_c は $8\text{-}20\text{ kOe}$ (640 kA/m - 1.6 MA/m) 以上と巨大である⁶。(この媒体は一種のフェリ磁性体であって、室温付近に補償温度をもつが、このため室温での磁化 M_s が小さくなっており、 $H_c = 2Ku/M_s$ の関係によって H_c が大きな値をもつのである。)

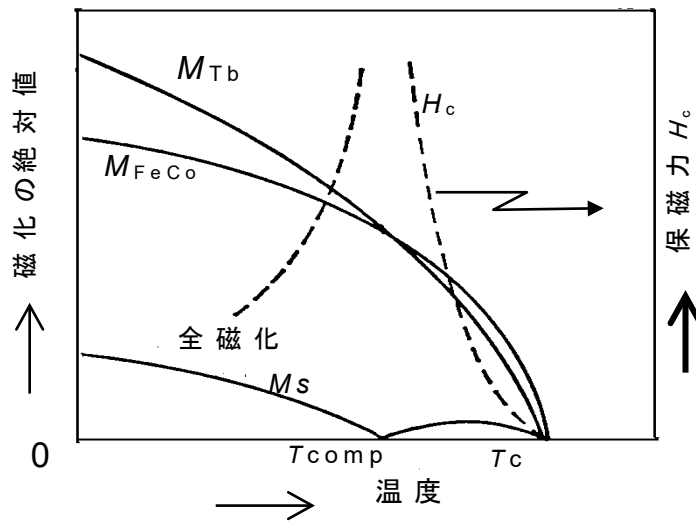


図 4 MO ディスク媒体における保磁力の温度変化

しかし MO ディスクの媒体をそのまま使ったのでは、磁気ヘッドでは再生できない。なぜなら、室温付近で媒体の M_s が 0 に近いからである。(MO ディスクでは、光を使って FeCo の磁化を磁気光学効果を通じて検出するので M_s が 0 であっても再生できるのである。) 一つの解決法が、記録層と再生層の分離である⁷。図 5 に示すように再生層の補償温度を記録層より高温側にシフトさせることにより、磁気ヘッドで再生するのに十分な磁化をもたせ

ることができる。もう一つの解決法が、再生の際にも熱アシストを行って、加熱された部分を補償温度からずらし M_s を強めて読み出す方法である⁸。再生トラックが複数のトラックにまたがっていても、加熱された部分のみヘッドに磁束を届けることができるので、微小領域の選択にも好都合である。

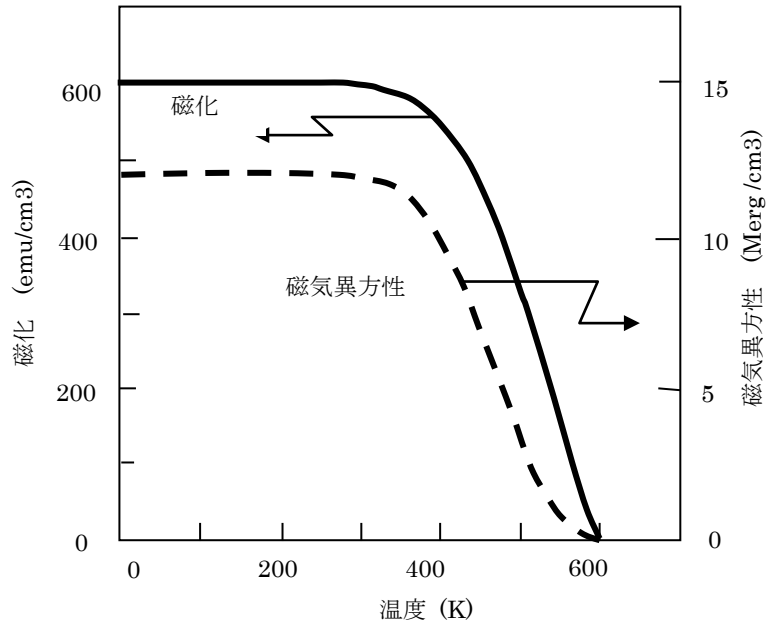


図 6 CoCr 系媒体における磁化と磁気異方性の温度変化

アモルファス TbFeCo のような連続媒体は通常の磁気記録には使えないとされてきた。これは、交換結合のために記録磁区が分離せず小さなビットを記録できないためのである。しかし、熱磁気記録では T_c の等温線で決まる磁壁に囲まれた微小磁区を記録できるので、記録磁区のサイズはレーザーのスポットサイズより小さくできる。ストロボ光式磁界変調記録 (LS-MFM) では 50 nm 程度のマークが記録できることが確認されている。

現行ハードディスクに用いられている粒子状媒体である CoCr 系媒体にも熱磁気記録することが可能である。この媒体の磁気異方性 K_u は図 6 に示すように T_c に向かって急激に減少するので、ナノ秒程度の短時間の加熱によって、弱い磁界でも磁化反転できるくらいまで一時的に H_c を低下させることができるので、高保磁力媒体に記録することが可能になる。この場合は、アモルファス TbFeCo 媒体におけるキュリー点記録と異なり、熱磁気記録というより熱アシスト磁気記録というべきものである。

この媒体を構成する各粒子の磁化が超常磁性により

失われる様子は KuV/kT と時間の指数関数となるので、高温に保たれている時間が長いとその間に減磁が起きてしまう。このことは、従って、加熱はできるだけ短時間に、かつ局所的になされなければならない。従って、媒体

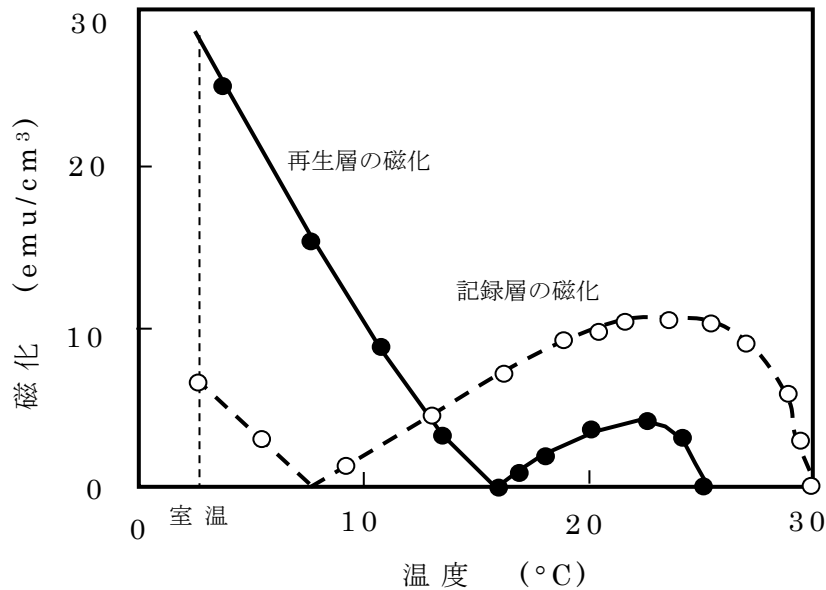


図 5 記録層と再生層の磁化の温度変化の比較

の設計に当たっては、結晶粒の配向制御による Ku の制御、キュリー温度の制御とともに、熱的な設計が重要性をもっている。1 Tb/in² の面記録密度は、25 nm×25 nm に相当するが、線速 25 m/s ならばビット時間は 1 ns となる。従って、非常に短時間に加熱・冷却できる必要がある。

このように多粒子媒体を用いるかぎり熱アシスト記録でも超常磁性の問題が避けられない。1 ビットが単磁区微粒子 1 個ずつに記録されるパターンディスクを用いれば、安定に高密度記録できるものと期待されている。これには、ナノリソグラフィを用いたトップダウンの微細化アプローチと、サイズのそろった微粒子の自己組織化によるボトムアップのアプローチが研究されている。前者は揺らぎのないパターンを精度よく作製出来るが、量産性が問題であり、コストも課題である。一方、自己組織化については、量産性、コストの点で有利であるが、広範囲にわたる微粒子の規則配列の困難さ、磁気異方性の配向制御の困難さが指摘されている。Kikitsuらはナノインプリント技術と自己組織化マスクの組み合わせにより、図7に示すように規則性をもった直径 40 nm の均一な CoCrPt 円柱状磁性ドットの規則配列に成功しており、今

後の展開が期待されている¹⁰。

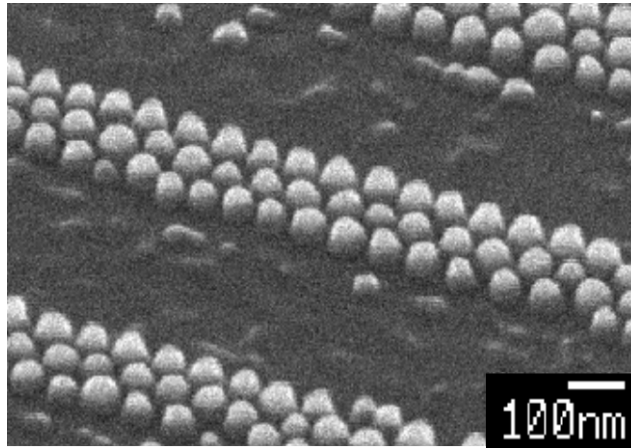


図7 ナノインプリント技術と自己組織化マスクを用いたパターン媒体 (Kikitsu による)

4. ハイブリッド記録をめざして

4.1 遠隔場ハイブリッド記録

日立のグループは、図8に示すような遠隔場(Far-field)のMO テスターでLS-MFM方式で微細磁区を記録し、GMR ヘッドで再生する実験を行った^{11, 12}。磁性層を記録層(MO 媒体と同様の膜)と再生層(補償温度を高温側にずらせた膜)の2層とし、さらにSiN 保護層を10nm, 5nm の2層に分け、その間に40nm のAl ヒートシンク層を設けることで冷却速度を向上し100nm のマークを良好に記録するのに成功している。

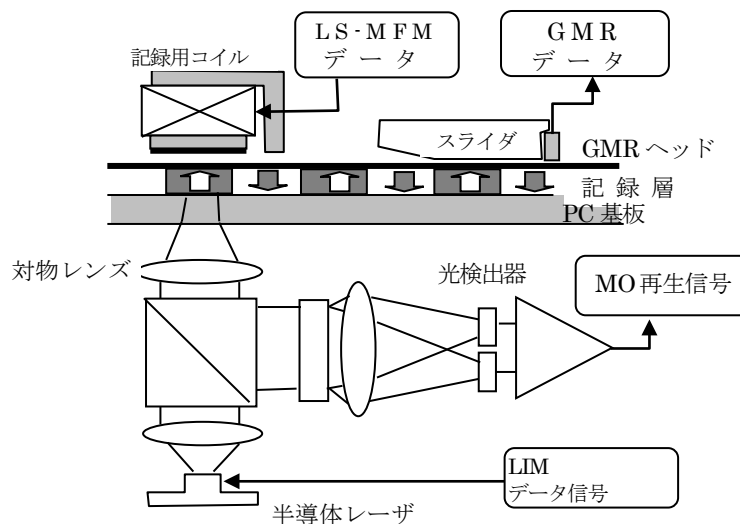


図8 MO テスターで光磁気記録し、GMR ヘッドで再生

4.2 SILを用いたハイブリッド記録

すでに述べたように 1 Tb/in^2 におよぶ高密度記録となるとビットのサイズは 25 nm 平方となるので、記録時のレーザスポットのサイズを 50 nm 以下に縮小する必要がある。通常のレンズ光学系では回折限界のためにレーザスポットをそれほど小さくすることができない。

このため固体浸漬レンズ(solid immersion lens=SIL)を用いた集光系が注目された¹³。半球型SILを用いればスポットサイズをレンズ光学系の屈折率分の1に、超半球では屈折率の二乗分の1に縮小できる。臨界角以下の入射光に対してSILはNAの大きなレンズと考えるもよいが、小さなスポットサイズはレンズの出口のすぐそばに限られる。また、臨界角より大きな入射角に対してはSILの近傍にエバネセント場が存在するので近接場記録と称されるが、厳密な意味での近接場記録ではない。解像度を上げるにはスライダと媒体の距離を 100 nm 以下にする必要がある。図9はSILを用いたハイブリッド磁気記録の実験システムである。ここでは、半球型SILを用い、LIM(光強度変調法)で熱磁気記録している。

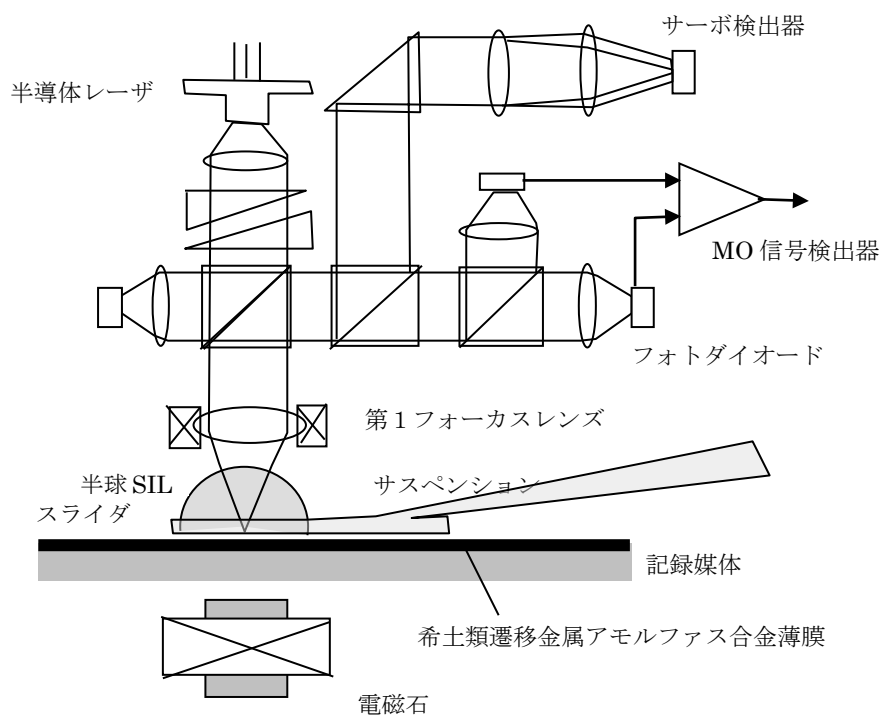


図9 近接場光学系を用いた光磁気記録システム

4.3 微小開口からの近接場

微小開口を利用して小さなスポットを作る試みが行われている。金属で光学素子を覆い、その金属に波長よりかなり小さな開口を設ける方法により微小光スポットが得られる。微細孔は金属をFIB加工することによって得られる¹⁴。

この方法により得られる光のスポットではエネルギー密度を大きくできないという問題点がある。これを解決し強いエネルギーの微小な光スポットを得る方法が、プラズモンによるエンハンスメントである。Ebbesenらは、微小開口の周りに同心円状に配置した金属リングによりプラズモンエンハンスメントで入射光より強い光が透過することを示した¹⁵。この技術を用いれば、高い効率で近接場光を利用できる。

半導体レーザ自体に金属マスクをつけ微細開口を開ける試みも行われている¹⁶。

4.4 光アンテナ

近接場光のエネルギー密度をエンハンスするもう1つの方法が、Groberらによって提唱されたボウタイ(蝶ネクタイ)型アンテナによる電磁場の集中である¹⁷。Groberらは、マイクロ波周波数に対しこの形のアンテナの中心部に電界の集中が起きることを検証し、光の周波数に対しても使用できると提案した。Matsumotoらは、電磁界計算を行い、ボウタイアンテナのギャップ程度の領域に光強度が集中していることを明らかにしている¹⁸。

5. 超解像、磁区拡大による微小ビットの再生

記録された微小磁区の読み出しについては、GMRヘッドを使うというのが一般的であるが、 1 Tb/in^2 の面記録密度に対応するために25 nmの磁極を作るのは非常に困難であるし、微小磁区からの洩れ磁界は非常に小さいので磁気ヘッドによって感度よく検出できるのかという問題がある。ここで、光磁気記録で開発された技術が再び注目されている。

光磁気記録では、磁気誘起超解像(MSR)技術とよぶ技術が確立している。超解像とは、波長以下の微細なスリットを通して微小な光像を観測する手法である。MSRはArataniらによって最初に発表された技術で、記録層と読

み出し層を分離し、レーザ照射によるスポットの高温部が焦点における光スポットより小さいことを用いて、記録層から再生層に選択的に磁気転写することによりスポットより小さな記録マークを再生できる¹⁹。MSR技術としては、FAD (front aperture detection)、RAD (rear aperture detection)、CAD (center aperture detection)という3種類の技術が知られている。市販されている3.5”のGIGAMOは、二重マスクのRADというMSR技術を用いており、 $\lambda=650$ nm(赤色レーザ)を用いて回折限界を超える直径300 nmのマークを読みとっている²⁰。GIGAMO(2.3GB)の記録密度は4 Gb/in²程度に達している。次世代規格であるASMOではLS-MFM法で記録された235 nmの小さなマークを、CADのMSR技術によって再生している²¹。この技術はiD-photoに用いられ、面記録密度としては約4.6 Gb/in²程度となる。

光磁気ディスクにおいては、さらに小さなマークを十分なSN比を以て光学的に読みとる方法として、磁区拡大再生(MAMMOS)および磁壁移動再生(DWDD)という光磁気記録特有の再生技術が開発された。

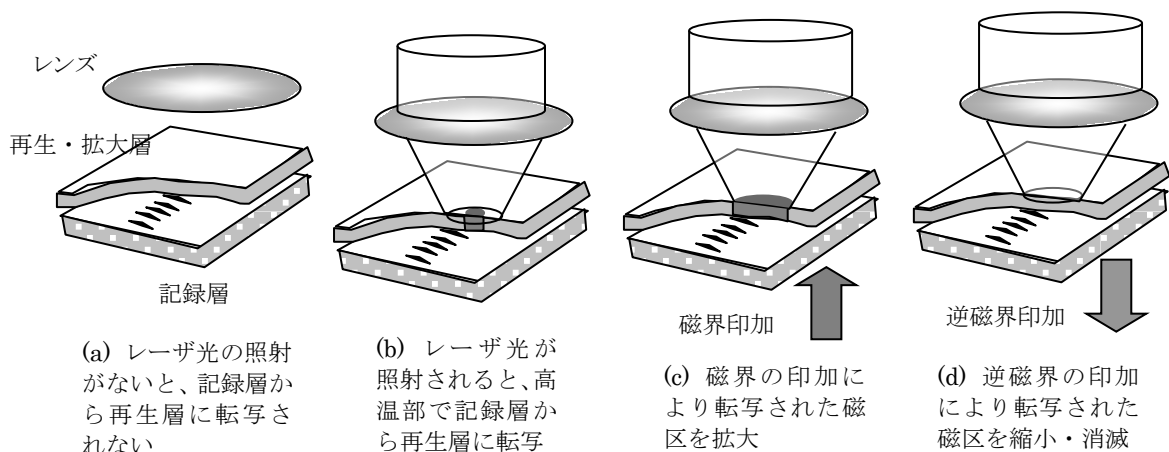


図 10 MAMMOS のプロセス

MAMMOS では記録層に書かれた100 nm程度の磁区から読み出し層に転写する際に磁界によって磁区を直径600 nm程度に拡大して、レーザ光の有効利用を図り信号強度を稼いでいる²²。原理的にはこの技術を用いて100 Gb/in²の記録密度が達成できるはずで、実験室レベルで

64 Gb/in² 程度までは実証されているようである²³。無磁界 MAMMOS も開発されている。

DWDDも記録層から読み出し層に転写する点は MAMMOSと同じであるが、転写された磁区を読み出し層の温度勾配を利用して磁壁を移動させて拡大するので、磁界を必要としない²⁴。DWDDについては新規格のハンディビデオ用 MO(2", 3GB)として商品化が検討された。DWDDを用いた大容量ハンディ AV機器としてミニディスク (MD)との上位互換性をもった Hi-MDが開発された。2004年に市販された Hi-MDでは、1 GBの容量をもつが、研究室では、80 nmのビットを DWDD再生することにより 4.7 GBの容量を持つものが開発されている²⁵。レーザ光は赤色のものを使っている。DWDDが機能するためにはスムーズな磁壁移動が行われることがポイントであり、案内溝側壁のアニールによる平坦化技術がキーを握っている。

MAMMOS および DWDD は微小な記録磁区を記録層から再生層に熱磁気転写する際に磁壁移動させて、光スポットのサイズの磁区を得ている。再生時に熱アシストをすることにより磁区が拡大させることができれば GMR ヘッドによる再生にも応用できると考えられる。

8. おわりに

この小文では、ハードディスクの超常磁性限界を突破し面記録密度 1 Tb/in² をめざす技術として注目される光磁気ハイブリッド記録(熱アシスト磁気記録)を中心に最近の動きを解説した。光を援用することで 1 Tb/in² という超高密度磁気記録に実現の可能性が見えてきた点がポイントである。ハイブリッド記録技術は日本発の技術でありながら、HAMR(heat-assisted magnetic recording)プロジェクトとして米国に先を越されてしまった。我が国でも遅まきながら 2002 年度からこの技術を含む「大容量光ストレージ技術の開発事業」が経済産業省の支援により推進されることとなった。ぜひ、一步先を行く技術として地平を拓いて欲しいと願っている。

参考文献

- ¹ 旧 IBM Web site (Nov. 10, 2002Browse)掲載 (IBM 磁気記録部門が日立グローバルストレージ社に吸収されたことによりこのサイトは現在存在しない) の図に加筆。
- ² 鈴木孝雄:「Data Storage 高密度化への模索」日本応用磁気学会第 113 回研究会「リムーバブル記録の現状と将来展望」(2000.12.1) 資料集 p.11.
- ³ T.W. McDaniel and W.A. Challener: *Proc. MORIS2002*, Trans Magn. Soc. Jpn. **2** (2002) 316.
- ⁴ E.N. Abarra, A. Inomata, H. Sato, I. Okamoto, Y. Mizoshita: *Appl. Phys. Lett.* **77**, 2581 (2000)
- ⁵ NE On Line 2003.4.23 の記事
- ⁶ 太田憲雄:「光と磁気の融合の可能性」日本応用磁気学会第 128 回研究会「磁気ストレージ技術の趨勢はどこに」(2003.1.30) 資料集 p.39
- ⁷ H.Nemoto, H. Saga, H. Sakeda and M. Takahashi: *Proc. MORIS1999*, J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1 (1999) 229.
- ⁸ H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima and K. Ohta: *Proc. MORIS1999*, J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1 (1999) 233.
- ⁹ J.J.M. Ruigrok: *Proc. MORIS2000*, J. Magn. Soc. Jpn. **25** (2001) 313
- ¹⁰ 喜々津哲、鎌田芳幸、稗田泰之、櫻井正敏、浅川鋼児、森田成二、内藤勝之: 第 27 回日本応用磁気学会学術講演会 (2003.9.18) 概要集 p.371.
- ¹¹ H. Saga, H. Nemoto, H. Sakeda, and M. Takahashi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 1839
- ¹² H.Nemoto and H. Saga: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 6379.
- ¹³ H. Sakeda, H. Saga, H. Nemoto, Y. Itou, C. Haginoya, T. Matsumoto: *IEEE Trans. Magn.* **37** (2001) 1234.
- ¹⁴ T.E. Schlesinger, T. Rausch, A. Itagi, J. Zhu, J.A. Bain, D.D. Stancil: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 1821.
- ¹⁵ T.W. Ebbesen, H.J. Lezec, H.F. Ghaemi, T.Thio and P.A.Wolff: *Nature* **391** (1998) 667
- ¹⁶ A. Partovi, D. Peale, M. Wuttig, C. A. Murray, G. Zydzik, L. Hopkins, K. Baldwin, W. S. Hobson, J. Wynn, J. Lopata, L. Dhar, R. Chichester, and J. H-J Yeh: *Appl. Phys. Lett.* **75** (1999) 1515.
- ¹⁷ R.D. Grober, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober: *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 1354.
- ¹⁸ T. Matsumoto, T. Shimano and S. Hosaka, *Technical Digest of 6th Int. Conf. Near Field Optics and Related Techniques, the Netherlands, Aug. 27-31, 2000*, p55
- ¹⁹ K. Aratani, A. Fukumo, M. Ohta, M. Kaneko, and W. Eatanabe: *Proc. SPIE 1499* (1991) 209.
- ²⁰ M. Moribe, M. Maeda, H. Nakayama, M. Yoshida, and K. Shono: *Digest ISOM'01, Th-1-01, Taipei, 2001*.
- ²¹ S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn.* **23**, Suppl. S1 (1999) 173
- ²² H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, and N. Ohta: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 4257.
- ²³ A. Itoh, N.Ohta, T. Uchiyama, A. Takahashi, M. Mieda, N. Iketani, Y. Uchihara, M. Nakata, K. Tezuka, H. Awano, S. Imai, and K. Nakagawa: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30- Nov. 2, Nagoya*, p. 90.
- ²⁴ T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *Proc. MORIS1997*, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, Suppl.S2 (1997) 47.
- ²⁴ M. Birukawa, Y. Hino, K. Nishikiori, K. Uchida, T. Shiratori, T. Hiroki, Y. Miyaoka and Y. Hozumi: *Proc. MORIS2002*, Trans. Magn. Soc. Jpn. **2** (2002) 273.
- ²⁵ K. Fujiie: *Digest MORIS2004*, May 17-19, Yokohama, p.8.