

5. 記録技術におけるナノテクノロジー

正会員 佐藤 勝 昭†

キーワード ● Storage, Nanotechnology, Magnetic Recording, Optical Recording, Heat-Assisted Magnetic Recording

1. ま え が き

2004年、世界の記録メディアの市場規模は、デジタル多用途ディスク (DVD) がビデオテープ (VTR) を抜き、映像記録媒体の主流に躍り出た¹⁾。ハンディビデオにおける記録媒体も光媒体になりつつある。また、最近のハードディスク (HD) を内蔵したDVD録画装置の伸びはめざましいものがある。蓄積型放送のスタートも日程にのぼる。膨大な動画データの高い転送レートで高密度に記録する技術への要請は非常に強いものがある。さらに、放送局において、ハイビジョン撮像が日常化するにともない、非圧縮で記録できるハイエンドの記録技術に対する要望も強い。

このようなさまざまな要望に応えるために、光、磁気を問わず、記録密度の向上とデータレートの向上が強く求められている。当面の目標とされる記録密度は1Tbpiとされるが、これは、1ビットが25nm×25nmの領域に記録されることを意味し、技術的に未知の領域であり、光記録、磁気記録ともに多くの壁が立ちはだかっている。ナノテクノロジーなくしてはこの課題を解決し、次世代記録技術を実用化することはできない。ここでは、記録技術におけるナノテクノロジーへの期待を述べたい。

2. 現行記録技術におけるナノテクノロジー

2.1 磁気記録の展開

現行磁気記録技術においても、ヘッド、媒体、ヘッド浮上・位置決め機構、記録磁区観察のすべてにおいて、すでにナノ領域の技術が使われている。

図1に示すように、ハードディスクの面記録密度の増加率は、1990年代はじめまでは10年に10倍の割合であったが、それ以後の10年では100倍になり、実験室レベルでは100Gbpsを超えた。これにともない、磁気ヘッドのコア幅は、2002年には100nmルールを切り半導体超LSIの微細加工を超えた²⁾。磁気記録に、半導体に先行するナノテクノ

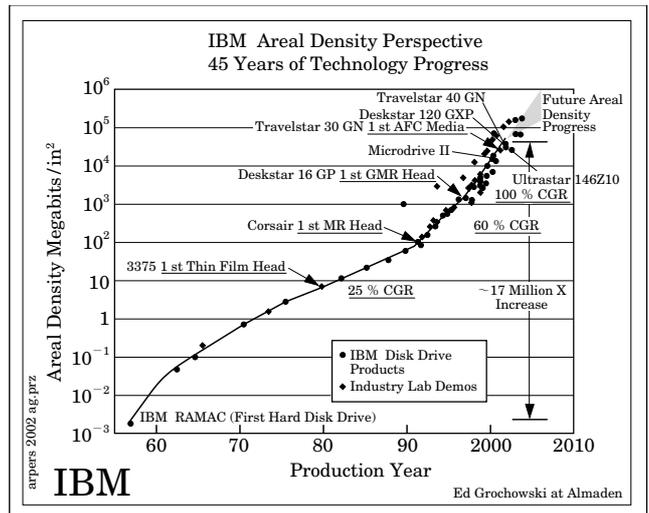


図1 ハードディスクの面記録密度の推移 (旧IBMホームページの図に加筆)

ロジーが使われていることは、意外に知られていない。

再生に用いられるGMRヘッドの構成は、基本的には、ディスクからの洩れ磁束を検出して磁化方向が変化する軟磁性フリー層、非磁性金属層、磁化の向きが変化しないピン止め層の3層からなるが、ピン止め層として2層の強磁性体を数ÅのRu (ルテニウム) を介して反強磁性結合させた合成反強磁性層が使われるなど、10層近い複雑なナノサイズの多層構造が使われている³⁾。

記録密度が高くなるに従い、微小な記録磁区から洩れ出す磁束の到達範囲が狭くなったため、磁気ヘッドの媒体からの浮上距離は10nmを切るようになってきている。この高さには、ヘッドスライダの微細加工により、空気力学的に保証されている。また、トラックピッチが300nmと狭くなるにともない、ヘッドの位置決め制度も30nmという高精度が要求される。将来的にはトラックピッチは100nmの程度となるため、位置決めマイクロマシン (MEMS) によるマイクロアクチュエータの採用も検討されている。

しかし、磁気記録の高密度化の流れは限界に近づきつつある。磁化反転する領域の磁気異方性エネルギー KuV (ここに Ku は単位体積あたりの磁気異方性エネルギー、 V は反転領域の体積) が熱擾乱 kT (ここに、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度) より十分に大きくないと、記録されたビットが熱的に不安定になる「超常磁性限界」が存在する。

†東京農工大学 大学院 ナノ未来科学研究拠点
"Nanotechnology in Storage" by Tokyo University of Agriculture and Technology, Strategic Research Initiative for Future Nano-Science and Technology (Katsuaki Sato, Tokyo)

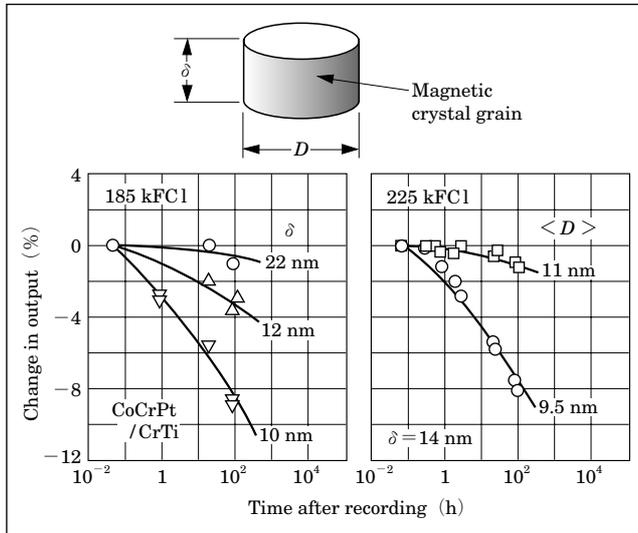


図2 面内磁気記録媒体の熱揺らぎによる出力減衰⁴⁾

図2は、CoCrPt媒体において結晶粒の高さや直径がナノメートルの領域で小さくなっていったときに、出力信号（残留磁化に相当）が記録後の時間経過とともにどのように減衰していくかを示している⁴⁾。

数年前まで、長手記録の記録密度の超常磁性限界は40GbpI付近にあるとされていたが、媒体の層構造を改善することによってこの限界を突破してしまった。これが、合成強磁性（SF）媒体または反強磁性結合（AFC）媒体と呼ばれる媒体構造である。SF媒体は、厚さ0.6~0.8nmのRu層を介して、二つの強磁性層がRKKY相互作用（伝導電子が仲介する磁氣的相互作用）で反強磁性結合した構造をもっている⁵⁾。上部層は記録層、下部層は安定化層と呼ばれ、記録層の反転磁界 H_k は安定化層の H_k より大きな値に設定される⁶⁾。2層間の反強磁性交換結合磁界のために実効的に KuV が増強されていることにより、熱安定性が確保されている。図3に示すように、SF媒体の磁化曲線は明確な二段階のヒステリシスになっており、残留磁化 M_r が減少している。

2002年5月のIntermag時点で各社（実験室レベルであるが）100GbpIを超える面記録密度を達成している。HDの面記録密度は、その後の媒体技術の進展もあって、2003年時点において実験室レベルで150GbpIが実証されており、商品化レベルでは、2.5インチディスクで70GbpIを超えている⁷⁾。現行の長手記録を延命させようという努力はめざましいものがあり、実験室レベルでの長手記録の線記録密度は、2003年時点で500kFCIを遙かに超え800kFCIに達する勢いとなっている。

長手記録での高密度化の進展は、記録密度が150GbpIに達した前後から急速に限界が見え始めてきたため、2004年からはいよいよ垂直時代へと突入すると見られている。2003年、米Read-Rite社は垂直記録方式で145GbpIを実現したと発表した。記録ヘッドの材料は、スパッタ法で形成したFeCoN。垂直記録用の単磁極ヘッドは、トラックの脇に余

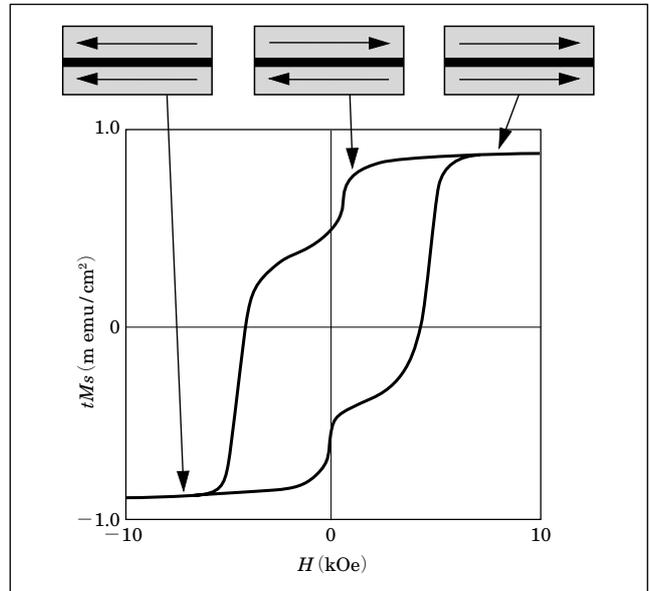


図3 SF媒体の磁化曲線

分に書込むことを防ぐために、ハード・マスクとイオン・ミリングで12°の角度がついた台形に加工している。台形の長辺の長さは200nm、高さは300nm。この単磁極ヘッドを用いて、面記録密度145GbpI、線記録密度772kBPi、トラック密度185kTPIを実現した⁸⁾。このように垂直磁気ヘッドはナノテクノロジーなしには考えられない。

富士電機は、特性を大幅に改善した垂直記録媒体を開発し、この媒体を用いて2003年春の時点ですでに169GbpIを実証した。線記録密度は850kbpI、トラック密度は199kTpiで、ビット誤り率は $1 \times 10^{-4.1}$ である⁹⁾。さらに同社は、2004年になり低雑音で熱揺らぎに強い記録媒体の開発に成功、これにより垂直記録方式の製品化が現実味を帯びてきた。開発した記録媒体を用いてすでに面記録密度162GbpI相当での記録再生を達成しており、この媒体を改良すれば400GbpIまで到達する可能性があることも示唆している。単なる研究開発の段階を終えて、すでに量産化の検討も始めているという¹⁰⁾。

米SeagateTechnology LLCは、2004年1月の9th Joint MMM-IntermagConferenceで、垂直記録方式を用いて面記録密度170GbpIを実証したと発表したが、記録密度の向上は垂直記録においても明らかに減速しており、同社の1年前の発表に比し、わずか16%ほどしか向上していない。HDD技術が超常磁性限界に近づきつつあることは確かである。

熱揺らぎに対する究極の磁気記録媒体として研究されているのが、パターンディスク技術である。一つのビットを一つの単磁区エレメントに記録することにより、磁壁の遷移領域をなくし、ノイズを極小化できることが期待される。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¹¹⁾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¹²⁾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できるが、量産性が問題であり、コストも課題である。一方、自己組

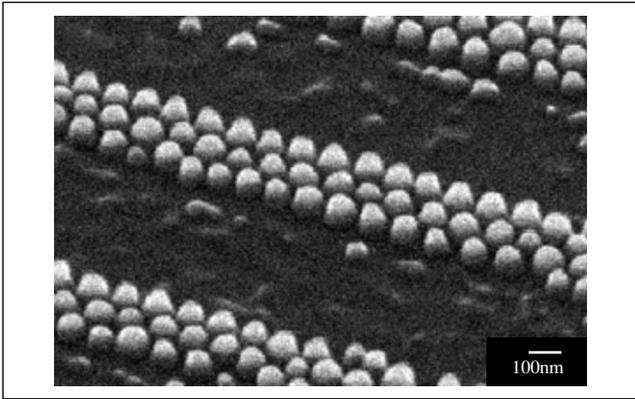


図4 ナノインプリント技術と自己組織化マスクを用いたパターン媒体 (喜々津による)

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。喜々津らは、ナノインプリント技術と自己組織化マスクの組合せにより、図4に示すような規則性をもった、直径40nm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¹³⁾、今後の展開が期待されている。

2.2 光ディスクの展開

1980年代高密度ストレージの本命とされた光ディスクは記録密度が伸び悩み、1990年代半ばになると、GMRヘッドなど新技術を取り込んだハードディスク (HD) にあっさりと記録密度の首座を明け渡してしまった。

よく知られているように、光は回折限界のため、焦点でのスポットサイズ d を $0.6 \times \lambda / NA$ 程度より小さくすることができないので、小さなビットが読みとれないという問題がある (ここに λ は光の波長であり、NAはレンズの開口数である)。現行のDVDでは、赤色レーザー ($\lambda=650\text{nm}$) で、 $NA=0.65$ のレンズが用いられ、そのスポットサイズは600nmなので面記録密度は3Gbpiの程度にしかない。

我が国で開発された青紫色レーザーは、最近になって複数の会社から安定供給できるようになり、これを用いた光ディスクが登場した。ブルーレイディスク (BD) の仕様では、 $\lambda=405\text{nm}$ の青紫色レーザーを光源とし、 $NA=0.85$ の高NAレンズを用いることにより、 $d=280\text{nm}$ のスポットに絞り込みが可能で、記録密度は約8Gbpiになる。相変化記録の場合、4層程度にまで多層化できるので、記録密度は層の数分だけ増大する。HD-DVD仕様では現行と同じ $NA=0.65$ のレンズを用いるので、BDに比べると記録密度は低い。

NAの大きなSIL (半球型の浸漬レンズ) を用いれば、レンズを記録膜に近づける必要があるが、スポットはさらに小さくできる。NA=2のSILを使うとすると、スポットサイズは120nmの程度、記録密度は40Gbpiを超える。

ROMの場合は、ビットの内外からの反射光の干渉でデータを読みとるので、ビット径は d の半分以下にできる。BD用ROMをSIL ($NA=2.05$) を使って再生する場合、ビット

長約70nmのマークが再生可能である。トラックピッチ130nmとすると、記録密度は100Gbpiに達すると考えられる。

最近、差動排気系を用いた真空チャンバ不要の電子ビーム描画装置を用いて、ビットサイズ70nmのマスタリングに成功したことが報告された¹⁴⁾。ここでも、半導体加工技術を超えるナノテクノロジーが採用されている。

DVD-RWのような相変化ディスクの場合には、後述する光磁気ディスクのような磁気的な転写を使えないので、超解像技術を適用するのが難しいとされていたが、産総研で開発されたSuper-RENS方式により、回折限界を超えて0.1 μm の微小マークの再生が可能になっている¹⁵⁾。

DVD用相変化記録材料の課題は転送速度である。1970年当初、光メモリーが提唱された当時の結晶化に必要なレーザー加熱時間は μm のオーダーであったが、今日のDVD-RAMなどの相変化材料では数十から数nsのオーダーまで短縮されている。結晶化時間は結晶構造に依存し、データレートを決定する重要な材料特性となっている¹⁶⁾。次世代DVDでハイビジョン信号を非圧縮で記録するには、多くの問題が残されている。この解決を目指して、ナノ領域におけるnsオーダーの結晶化機構のダイナミクスをシミュレートし、観察する基礎研究も進められている¹⁷⁾。

2.3 光磁気ディスクの展開

光磁気記録は、光の性質に加えて磁性体独特の性質を用いることができるので、密度の点ではDVDより有利である。

記録マークのサイズはキュリー温度記録を使っているため、50nmサイズの小さな記録磁区が安定的に記録できることが確かめられている。したがって記録密度は、再生の際の回折限界で決まってくる。

光磁気ディスクの多層化は、金属膜を用いるため相変化ディスクに比べ難しいが、波長多重2層化について実験が行われ、20Gbpi程度の記録密度が実証されている¹⁸⁾。

光磁気記録では、記録層と読み出し層を分離し、レーザー照射による加熱を用いて記録層から再生層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。これを磁気誘起超解像 (MSR) 技術という。MSR技術は3.5インチのGIGAMOとして実用化されており、 $\lambda=650\text{nm}$ (赤色レーザー) を用いて回折限界を超える直径300nmのマークを読みとっている¹⁹⁾。GIGAMO (2.3GB) の記録密度は4Gbpi程度である。次世代規格であるASMOでは磁界変調記録法を採用することにより235nmの小さなマークを記録することが可能で、面記録密度としては約4.6Gbpi程度となる²⁰⁾。

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。

MAMMOSでは、記録層に書かれた100nm程度の磁区か

ら読出し層に転写する際に、磁界によって磁区を直径600nm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²¹⁾。原理的には、この技術を用いて100Gbpsの記録密度が達成できるはずで、実験室レベルで64Gbps程度までは実証されているようである²²⁾。無磁界MAMMOSも開発されている。

DWDDも記録層から読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²³⁾。DWDDについては新規格のハンディビデオ用MO(2インチ, 3GB)として商品化が検討された²⁴⁾。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²⁵⁾。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。

3. 光アシスト磁気ディスクとナノテクノロジー

以上述べたように、磁気記録技術、光記録技術ともに現行技術の延長上で考える限り、高密度化に限界が見えてきた。

磁気記録密度が1Tbpsを超えるには、マークサイズはアスペクト比を1:2として、18nm×35nmにまで縮小しなければならない。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。これを解決するための一つの回答が光アシスト磁気記録である。

この目的に、MOディスク、ミニディスク(MD)技術として確立した熱磁気記録技術が利用可能である。実際に市販されているMDでは、アモルファスTbFeCo材料を用い、キュリー点記録時の温度は250℃くらい、記録用磁界はたったの200Oeであるが、室温での H_c は8-20kOe以上と巨大である²⁶⁾。

熱磁気記録に用いられる媒体としては、室温付近で大きな H_c を示し、温度上昇とともに通常の磁気ヘッドで記録できる程度に H_c が減少する媒体が望ましい。現行MO媒体であるTbFeCo系の場合、補償温度が室温付近に来るよう膜組成が制御されているため、室温付近での M_s が小さく、したがって、 H_c が大きいため、超常磁性効果に対して有効である。しかし、GMRヘッドを用いた磁気読出しにおいては不利である。一つの解決法が、記録層と再生層の分離である。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得ることができる²⁷⁾。この他、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 を強めて読出す方法もある²⁸⁾。

一方、粒子状媒体であるCoCr系媒体においては、図5のように室温からの温度上昇とともに H_c は急激に低下するの

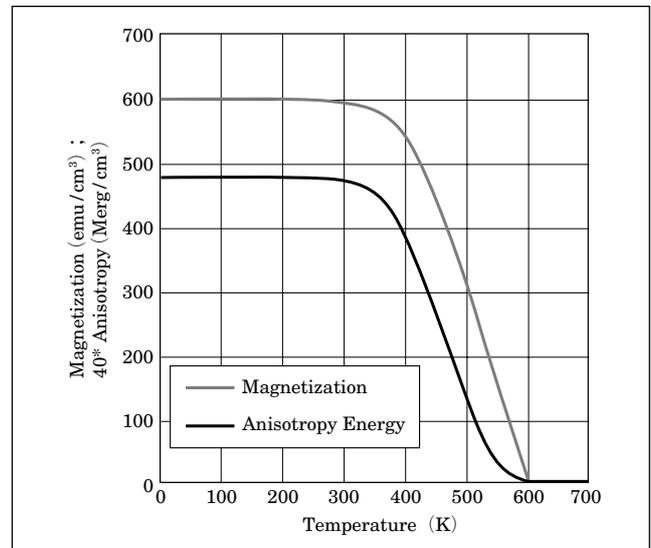


図5 熱アシスト媒体用多粒子媒体の磁化と磁気異方性の温度変化

で、短時間加熱することによって、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。これにより、高保磁力媒体に記録することが可能になる。この媒体の磁化が超常磁性により失われる様子は、先に述べた KuV/kT と時間の指数関数となるので、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²⁹⁾。したがって、媒体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。25nm×25nmの領域を線速25m/sで通過するならば、ビット時間は1nsとなる。したがって、非常に短時間に加熱・冷却できるナノ領域の熱設計が重要になる。

日立のグループは、遠隔場のMOテスターでストロボ光式磁界変調記録(LS-MFM)によって微細磁区を記録し、GMRヘッドで再生する実験を行った^{30) 31)}。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、Al層がないときにはうまくかけなかった100nmのマークを良好に記録するのに成功している。

マークサイズを25nmとするには、記録時のスポットサイズを50nm以下に縮小する必要がある。通常の遠隔場記録の場合、100nmを切るような磁気記録は非常に困難であるから、この解決のために、ハイブリッドヘッドにSILを用いて回折限界を伸ばす方法³²⁾、および、金属マスクに微小な開口を設けて開口からの近接場を利用する方法³³⁾が提案され実験されている。

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。SILの近傍にはエバネセント場が存在する。解像度を上げるには、スライダと媒体の距離を100nm以下にする必

要がある。光導波路にレンズを作り込むことも考えられている。SILでスポット径を100nm以下にするのは、かなり難しいと考えられている。

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³⁴⁾。半導体レーザー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³⁵⁾。

上述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。北米NECのグループは、微小開口の周りに同心円状に配置した金属リングによるプラズモンで、入射光より強い光が透過することを示した³⁶⁾。また、英国日立のグループ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がある³⁷⁾。彼らは、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。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³⁸⁾ ³²⁾。

このように、プラズモンによるエンハンス効果を用いれば、波長以下のサイズのスリットから十分な光量が取出せることが明らかにされており、光アシスト磁気記録への応用に期待が集まっている。

4. む す び

この小稿では、磁気記録および光記録技術におけるナノテクノロジー利用の現状と今後の展望について簡単に述べた。なお、紙数の関係で、対象をディスク形の記録技術に限り、ホログラフィなどの固体高密度光記録技術やMRAMや、PRAM（相変化RAM）、MEMSメモリーなどのナノテクノロジーを用いた不揮発性メモリーについては省略せざるを得なかったことをお断りする。

(2004年6月22日受付)

〔文 献〕

- 1) 日本経済新聞, 2004年5月20日
- 2) 松崎幹男: “ハードディスクの最近の技術動向と新たな応用の展開”, 日本応用磁気学会第124回研究会, p.9 (Mar. 2002)
- 3) 押木満雅: “100Gb/in²時代の磁気記録”, 日本応用磁気学会第118回研究会, p.13 (Feb. 2001)
- 4) 細江謙: “日本応用磁気学会サマースクール”, p.97 (2003)
- 5) E.N. Abarra, A. Inomata, H. Sato, I. Okamoto, Y. Mizoshita: Appl. Phys. Lett. 77, 2581 (2000)
- 6) 猪又明大, E. Noel Abarra, B.R. Acharya, 岡本巖: “100Gb/in²時代の磁気記録”, 日本応用磁気学会第118回研究会, p.87 (Feb. 2001)
- 7) 三浦義正: “超高密度磁気記録の現状”, 「磁気ストレージ技術の趨勢はどこに」日本応用磁気学会第128回研究会, p.1 (Jan. 2003)
- 8) NE on Line 2003.4.2

- 9) NE on Line 2003.4.23
- 10) 日経エレクトロニクス2004年01月19日号, 865
- 11) G.F. Hughes: IEEE Trans Magn., 36, 521 (2000)
- 12) S. Sun, C.B. Murray, D. Weller, L. Folks, and A. Moser: Science, 287, 1989 (2000)
- 13) 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”, p.371 (Sep. 2003)
- 14) M. Furuki, M. Takada, M. Yamamoto, M. Shinoda, K. Saito, Y. Aki and H. Kawase: Digest MORIS 2004, p.88 (2004)
- 15) J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano and N. Atoda: Jpn. J. Appl. Phys., 39, 957 (2000)
- 16) 山田昇: “大容量記録技術を支える結晶工学”, 応用物理学会結晶工学分科会第114回研究会, p.35 (June 2001)
- 17) 清水直樹, 木下延博, 石井紀彦, 佐藤勝昭, 藤田欣裕: 日本結晶学誌, 30, p.18 (2003)
- 18) 伊藤彰義: 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」, p.31 (Jan. 2003)
- 19) M. Moribe, M. Maeda, H. Nakayama, M. Yoshida, and K. Shono: Digest ISOM'01 (2001)
- 20) S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl., S1 173 (1999)
- 21) H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, and N. Ohta: Appl. Phys. Lett., 69, 4257 (1996)
- 22) A. Itoh, N.Ohta, T. Uchiyama, A. Takahashi, M. Mieda, N. Iketani, Y. Uchiyama, M. Nakata, K. Tezuka, H. Awano, S. Imai, and K. Nakagawa: “Digest MORIS/APDSC2000”, p. 90 (2000)
- 23) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: Proc. MORIS1997, J. Magn. Soc. Jpn. 22, Suppl., S2, 47 (1997)
- 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, 273 (2002)
- 25) K. Fujiie: “Digest MORIS2004”, p.8 (2004)
- 26) 太田憲雄: 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」, p.39 (Jan. 2003)
- 27) H. Nemoto, H. Saga, H. Sakeda and M. Takahashi: Proc. MORIS1999, J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl. S1, 229 (1999)
- 28) H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima and K. Ohta: Proc. MORIS1999, J. Magn. Soc. Jpn. 23, Suppl. S1, 233 (1999)
- 29) J.J.M. Ruigrok: “Proc. MORIS2000, J. Magn. Soc. Jpn. 25, 313 (2001)
- 30) H. Saga, H. Nemoto, H. Sakeda, and M. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys. 38, 1839 (1999)
- 31) H. Nemoto and H. Saga: “Jpn. J. Appl. Phys. 40, 6379 (2001)
- 32) H. Sakeda, H. Saga, H. Nemoto, Y. Itou, C. Haginoya, T. Matsumoto: IEEE Trans. Magn. 37, 1234 (2001)
- 33) T.E. Schlesinger, T. Rausch, A. Itagi, J. Zhu, J.A. Bain, D.D. Stencil: Jpn. J. Appl. Phys. 41, 1821 (2002)
- 34) F. Isshiki, K. Ito, K. Etoh, S. Hosaka: Appl. Phys. Lett. 76, 804 (2000)
- 35) 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, 1515 (1999)
- 36) Ebbesen T. W., Lezec H. J., Ghaemi H. F., Thio T. and Wolff P. A.: Nature 391, 667 (1998)
- 37) R.D. Grober, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober: Appl. Phys. Lett. 70, 1354 (1997)
- 38) T. Matsumoto, T. Shimano and S. Hosaka: Technical Digest of 6th Int. Conf. Near Field Optics and Related Techniques, the Netherlands, p.55 (Aug. 2000)

まとう かつあき
佐藤 勝昭 ?