

# 光磁気ハイブリッド記録

東京農工大学 佐藤勝昭

## 1. はじめに

いま、情報技術(IT)を得て社会構造が急速に変化しつつあり、高密度・大容量記録へのニーズはとどまることを知らない。記録対象は、文書から画像、さらには、動画へと発展し、ユーザも、専門家、一般職、さらには、家庭へと広がり、大容量だけでなく高速化へのニーズが付け加わっている。ネットワークの進展はストレージを不要にする等という議論がされた時期もあったが、最近では、端末だけでなく LAN, WAN 等のノードにおいても大容量・高速ストレージの必要性がむしろ高まりつつあるように思える。増え続ける情報を蓄積するためには、2010年時点で  $1\text{Tb}/\text{in}^2$  の高密度ストレージが必要とされる。

1980年当時、ハードディスクの記録密度は  $10\text{Mb}/\text{in}^2$  に過ぎず、 $250\text{Mb}/\text{in}^2$  の記録密度をもつ光ディスクこそが高密度記録の本命であるとされた。しかし、記録密度の大きな向上は光の回折限界のため望めず、磁気誘起超解像を利用した光磁気ディスクにおいて  $5\text{Gb}/\text{in}^2$  を達成したが、1990年代後半になると、GMRヘッドなど

新技术を取り込んだハードディスクにあっさり記録密度の首座を明け渡してしまった。現在、青紫色レーザの登場で再び光ディスクの高密度化が進みつつあるが、BluRay<sup>®</sup> Disk でさえ、記録密度は  $19.5\text{Gb}/\text{in}^2$  に過ぎない<sup>1</sup>。一方、光磁気記録では磁区拡大再生、磁壁移動検出などの新技术が開発され、 $100\text{Gb}/\text{in}^2$  を目指した研究が行われている<sup>2</sup>。

これに対して、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

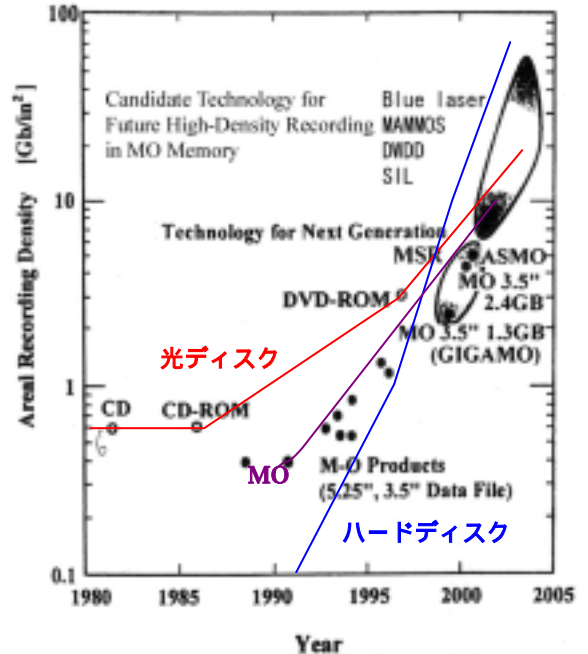


Fig. 1 光ディスクの面記録密度の推移  
鈴木：MSJ113 研究会資料(2000.1) p.11

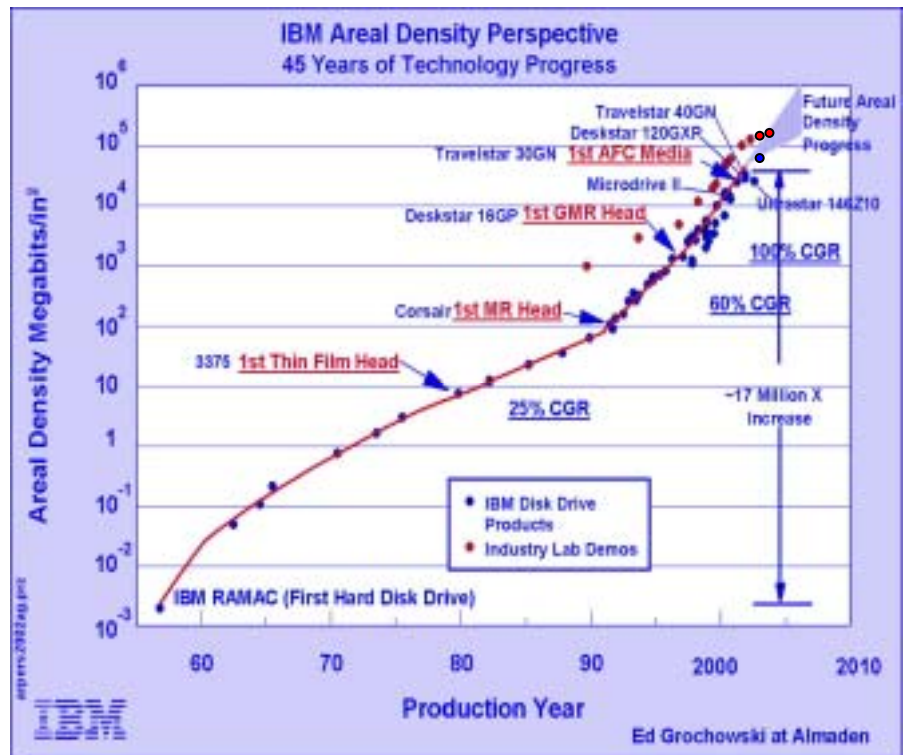


Fig. 2 ハードディスクの面記録密度の推移  
(旧 IBM ホームページの図に加筆)

れてきた。Fig. 2 に示すように、1970 年から 1990 年にかけての記録密度の増加は 10 年で 10 倍の伸び率であったが、1990 年代になると 10 年で 100 倍という驚異的な伸び率で増大した。これは再生用磁気ヘッドの進展によるところが大きい。その後も記録媒体のイノベーションにより、実験室レベルでは  $100\text{Gb/in}^2$  を超えるにいたった。しかし、2000 年を過ぎた頃からこの伸び方にブレーキがかかってきた。これは、後述するように磁性体の微細化による超常磁性限界が見え始めていることが原因とされる。

このように、光ディスクでは回折限界があり、磁気記録では超常磁性限界があって、高密度化の進展を阻んでいる。これを解決するためのアイデアの 1 つが、光磁気ハイブリッド記録(熱アシスト磁気記録)である。この講演では、ハードディスクと光ディスクの動向を述べた後、光磁気ハイブリッド技術のための要素技術を紹介する。

## 2. ハードディスクの動向と光ディスクの動向

### 2.1 ハードディスクの動向

現在使われているハードディスク媒体は CoCrTa など CoCr 系の多結晶媒体である。Fig. 3 に示すように強磁性の CoCr 合金の微結晶粒が偏析した Cr 粒に囲まれ、互いに分離した膜構造になっている。これにより交換相互作用を切って、高分解能を得るとともに、粒子サイズを小さくすることで転移ジッタを減らし低雑音を実現してきた。

粒子の微細化に伴い、記録された情報が安定に保持されないという現象が問題になってきた。Fig. 4 は、CoCrPt 媒体において結晶粒の高さや直径が小さくなったときに、どのように出力信号(残留磁化に相当)が記録後の時間経過とともに減衰していくかを示している。

この現象は、記録磁化を保持するためのエネルギー(異方性磁気エネルギー)が熱的な揺らぎのエネルギー  $kT$  と等しくなるときに起きる。異方性磁気エネルギーは、単位体積あたりの磁気異方性エネルギーを  $K_u$  とし粒子の体積を  $V$  として  $K_u V$  で表される。粒子の体積が小さくなると  $K_u V$  が減少し、熱揺らぎ  $kT$  によって磁化がランダムに配向しようとして減磁する。この現象による記録限界を超常磁性限界と呼んでいる\*。熱安定性を確保するには、 $K_u V/kT$  が 60 以上なければならない。

数年前まで、長手記録の記録密度の超常磁性限界は  $40\text{Gbits/in}^2$  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、この限界を伸ばすことが行われた。これが、反強磁性結合(AFC)媒体と呼ばれる媒体構造である。AFC 媒体は Fig. 5

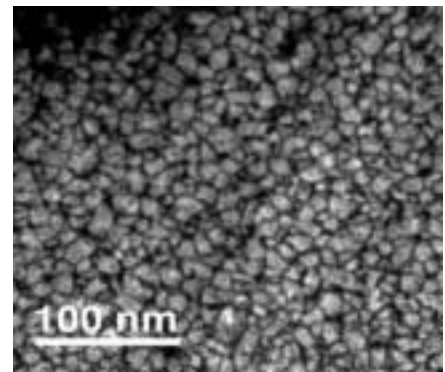


Fig. 3 CoCrTa 媒体の Co 元素面内分布(Oak Ridge National Lab.の H P より)

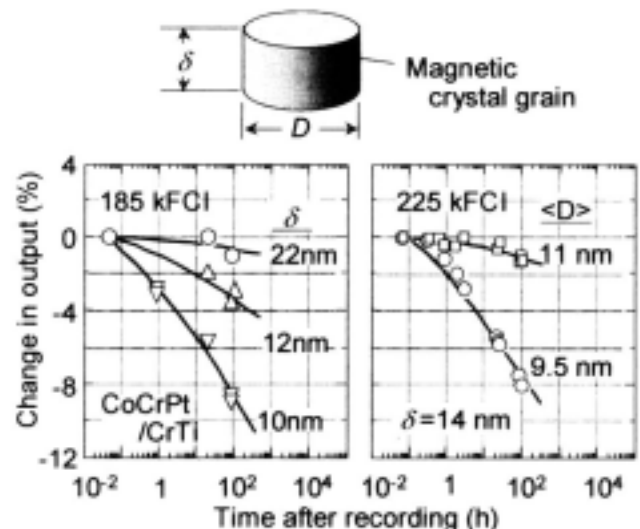


Fig. 4 面内磁気記録媒体の熱揺らぎによる出力減衰 (細江譲: MSJ サマースクール 27 テキスト p.97 (2003)より)

\*常磁性はランダムに配向している磁性イオンの磁気モーメントが印加磁界方向に配向していく非常に弱い磁性であるが、「超常磁性」では、イオンではなく強磁性粒子がランダム配向するので、ヒステリシスがなく弱い磁界での磁気飽和現象が見られる。高密度磁気記録で見られる磁性は、ヒステリシスを示すので完全な超常磁性ではない。

の模型に示すように薄い(6-8Å)Ru(ルテニウム)層を介して薄い強磁性層をRKKY相互作用による反強磁性結合した構造をもっている<sup>3</sup>。上部層は記録層、下部層は安定化層と呼ばれ、記録層の  $H_k$  は安定化層の  $H_k$  より大きな値を設定される。Fig. 6 は 2 種類の AFC 媒体 (富士通では SF 媒体と称している) の構造を示している<sup>4</sup>。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。Fig.7 は SF 媒体の磁化曲線で明確な 2 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)100Gbits/in<sup>2</sup> 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 150 Gb/in<sup>2</sup> が実証されており、商品化レベルでは 2.5" ディスクで 70 Gb/in<sup>2</sup> を超えている<sup>5</sup>。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 500kfc(i=flux change per inch) を遙かに超え 800kfc(i 記録マークのアスペクト比 1:2 として面記録密度 320 Gb/in<sup>2</sup> に相当) に達する勢いとなっている。

しかし、150 Gb/in<sup>2</sup> に達した前後から、急速に面内記録での高密度化に限界が見え始め、2004 年はいよいよ垂直時代に踏み込むのではないかと見られている。2003 年、米 Read-Rite 社は垂直記録方式で 145 Gb/in<sup>2</sup> 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、トラックの脇に余分に書き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 度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 0.2μm、高さは 0.3μm。この単磁極ヘッドを用いて、面記録密度 145 Gb/in<sup>2</sup>、線記録密度 772kBPI、トラック密度 185kTPI を実現した<sup>6</sup>。

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 169Gbit/in<sup>2</sup> 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<sup>7</sup>。さらに同社は、2004 年になり垂直記録方式を実用化する上で大きな課題だった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、現行の長手記録方式と比べて高密度化に向くとされている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既に面記録密度 162 Gb/in<sup>2</sup> 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 400 Gbit/in<sup>2</sup> 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、既に量産化の検討も始めているという<sup>8</sup>。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 170 Gb/in<sup>2</sup> を実証したと発表した。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

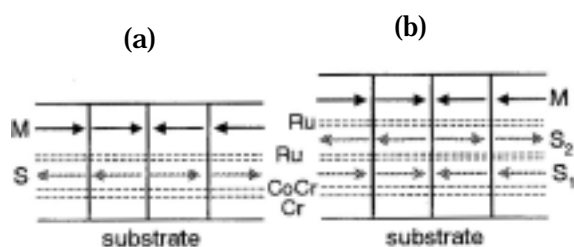


Fig.6 2種類のSF媒体の構成図  
(a) 1層の安定化層、(b)2層の安定化層

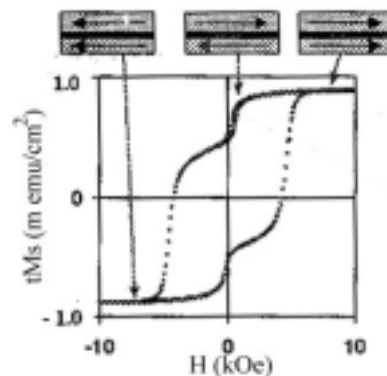


Fig. 7 SF媒体の磁化曲線

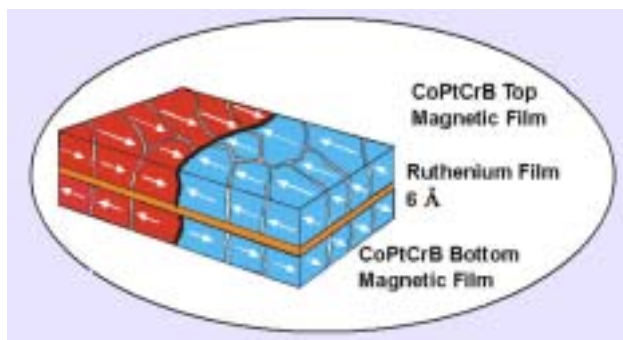


Fig. 5 AFC媒体の模式図 (旧IBMのホームページより)

に比しわずか 16%ほどしか向上していない。

## 2.2 光ディスクの動向

### (a) 短波長化

光ディスクの面記録密度を決めている最も大きな要素は再生時にレーザー光をどこまで小さく絞れるかである。Fig. 8 に模式的に示すように波長 $\lambda$ の光を開口数  $NA$  のレンズで絞ったときのスポットの直径  $d$  は回折限界で決まり、 $d=0.6\lambda/NA$  で与えられている。 $NA$  は、現在の CD 等に使われるレンズでは 0.6 程度なので、 $d$  は波長程度の値である。一方、記録の際には、同じ $\lambda$ を使って上記  $d$  より小さいピットを記録できる。それは、集光した光スポット内で温度の分布があり、相変化、光磁気ともにレーザー光強度がある閾値を超えた部分にのみ記録されるからである。

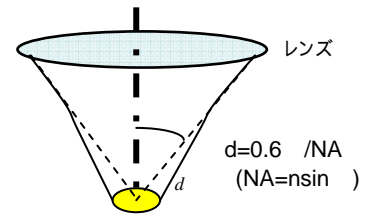


Fig. 8 レンズにより絞ったときに回折で決まる最小スポットの直径  $d$

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。光ディスクの面密度は原理的に  $1/d^2$  で決まるので、 $\lambda=405$  nm の青紫色レーザーを光源とし  $NA=0.85$  の高  $NA$  レンズを用いると  $d=0.28$   $\mu\text{m}$  のスポットに絞り込みが可能で、記録密度は約 8 Gb/in<sup>2</sup> になる。ROM の場合は、ピ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、ピット径は  $d$  の半分以下にできる。従って、トラックピッチを  $d=0.28$   $\mu\text{m}$  としピット長を  $d/2=0.14$   $\mu\text{m}$  とすると 16 Gb/in<sup>2</sup> 以上の面密度が得られる。なお、RAM の場合はマークの直径は光スポットと同程度なので、記録密度は 8 Gb/in<sup>2</sup> 程度である。相変化記録の場合、4 層程度にまで多層化できるので、記録密度はこの層数倍となる。光磁気記録においても多層化技術が開発されており、少なくとも波長多重 2 層化については 20 Gb/in<sup>2</sup> 程度の記録密度が実証されている<sup>9</sup>。

### (b) 超解像の応用

光磁気記録では、磁気誘起超解像(MSR)技術が実用化されている。ダブルマスクの RAD を採用した GIGAMO では、 $\lambda=650$  nm(赤色レーザー)を用いて回折限界を超える直径 0.3 $\mu\text{m}$  のマークを読みとっている<sup>10</sup>。直径 3.5" の GIGAMO(1.3GB)の記録密度は 2.5 Gb/in<sup>2</sup> 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 0.235  $\mu\text{m}$  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 4.6 Gb/in<sup>2</sup> 程度となる<sup>11</sup>。相変化ディスクの場合には、磁気的な転写ができないので超解像技術を採用するのが難しいが、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  $\mu\text{m}$  経の微小マークの再生が可能になった<sup>12</sup>。

### (c) 磁区応答・磁壁移動による信号増強

光磁気記録において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)という技術が開発された。これらは、光磁気記録特有の再生技術で、MAMMOS では記録層から読み出し層に転写する際に磁界によって磁区を拡大して、レーザー光の有効利用を図り信号強度を稼いでいる<sup>13</sup>。原理的にはこの技術を用いて 100 Gb/in<sup>2</sup> の記録密度が達成できるはずで、実験室レベルで 64 Gb/in<sup>2</sup> 程度までは実証されているようである<sup>14</sup>。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<sup>15</sup>。DWDD を用いた MO(2", 3GB)が新規格のハンディビデオ用カメラとして商品化が検討されている<sup>16</sup>。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 の発売が予定されている<sup>17</sup>。

### (d) 近接場技術

回折限界を超えた高密度化に欠かせないのが、近接場光学技術である。1991年、Betzigらは光ファイバーをテーパ状に細めたプローブから出る近接場光を用いて回折限界を超えた光磁気記録ができること、および、このプローブを用いて磁気光学効果による読み出しができることを明らかにし、将来の高密度記録方式として近接場光がにわかに注目を浴びることになった<sup>18</sup>。日立中研のグループはこの方法が光磁気記録だけでなく光相変化記録にも利用できることを明らかにした<sup>19</sup>。しかし、このように光ファイバ・プローブを走査するやり方では、高速の転送レートを得ることができない。このことを解決する方法として提案されたのが、SIL (solid immersion lens)<sup>20</sup>というレンズを用いた光磁気記録であるその後、SIL (solid immersion lens)を用いた近接場記録が提案された。Terrisらは波長780 nmのレーザー光を光源としSIL光学系を使ってTbFeCo膜に光磁気記録し、直径0.2 μmの磁区が形成されることをMFMにより確認した<sup>21</sup>。SILを磁気ディスク装置のヘッド・アセンブリ(いわゆるジンバル)に搭載して光磁気記録を行うアイデアが1994年Terrisらにより出された<sup>22</sup>。この方法により、面記録密度2.45 Gb/in<sup>2</sup>、データ転送速度3.3 Mbpsを達成したと発表されたが、実現しなかった。鈴木らはMFM(磁気力顕微鏡)を用いて、SIL記録されたマークを観測し2 Gmarks/in<sup>2</sup>を達成していると発表した<sup>23</sup>。

### 3 光磁気ハイブリッド記録

磁気記録密度が1Tb/in<sup>2</sup>を超えるには、マークサイズは25nm×25nm(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。これを解決する方法としていくつかの提案されている。保磁力の大きな媒体にどのようにして記録するのかという課題への1つの回答がパターンディスク技術であるが、もう1つの回答が熱磁気記録である。

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200 Oeであるが、室温でのHcはなんと8-20 kOe以上と巨大である<sup>24</sup>。

熱磁気記録に用いられる媒体としては、従来からHDDに用いられてきたCoCr系のグラニューラ媒体を利用する方法と、MO媒体として使われてきたアモルファス希土類遷移金属合金媒体を用いる方法が考えられる。また、短波長MO材料として検討されたPt/Co多層膜媒体を用いることも検討されている。いずれにせよ、室温付近で大きなHc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Hc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Msが小さく、従って、Hcが大きいので、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み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<sup>25</sup>。

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Msを強めて読み出す方法である<sup>26</sup>。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。

一方、粒子状媒体であるCoCr系媒体における磁気異方性はFig. 5の太線のような温度変化をする。

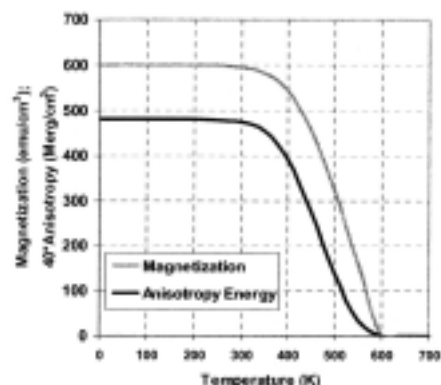


Fig.9 熱アシスト媒体用多粒子媒体の磁化と磁気異方性の温度変化。

室温からの温度上昇とともに  $H_c$  は急激に低下するので、 $ns$  程度の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  $\eta$  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<sup>27</sup>。従って、媒体の設計に当たっては、結晶粒の配向制御による  $K_u$  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/in<sup>2</sup> の面記録密度は、アスペクト比 1:1 のとき、25nm×25nm 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。

日立のグループは、Fig. 10 のような遠隔場の 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<sup>28,29</sup>。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。

はじめに述べたように 1Tbits/in<sup>2</sup> におよぶ高密度記録においては bit サイズは 25nm 平方となり、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 (Fig. 11)<sup>30</sup>、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<sup>31</sup>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が、伝搬光も存在するので厳密な意味では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 100nm 以下にする必要があり、リムーバブルにすることはむずかしいと考えられる。光導波路にレンズを作り込むことも考えられている。いずれにせよ、回折限界ぎりぎりで使うということで、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 (Fig. 12)<sup>32</sup>。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<sup>33</sup>。

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、

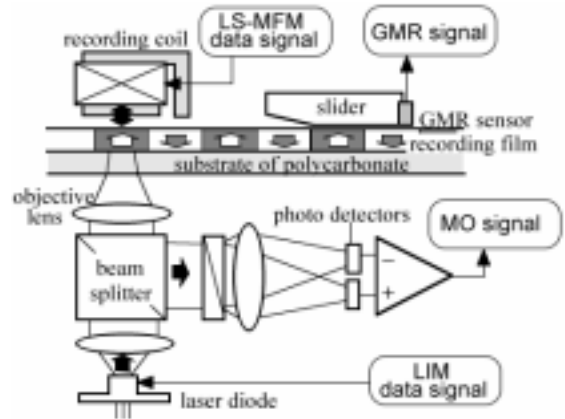


Fig.10 遠隔場ハイブリッド記録実験系

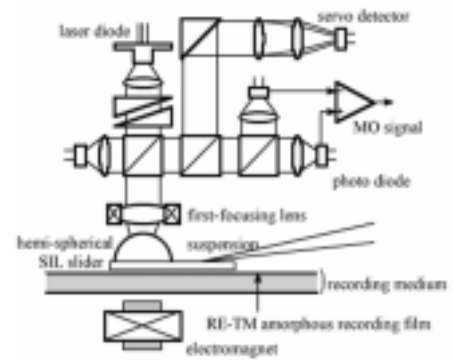


Fig. 11 SIL を用いたハイブリッド記録

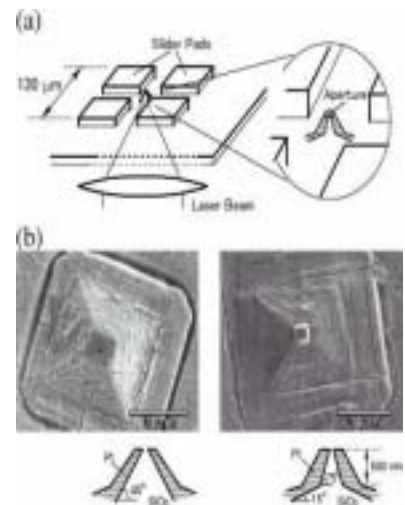


Fig. 12 微小開口による光記録ヘッド

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<sup>34</sup>。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<sup>35,30</sup>。

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、 $1\text{Tb/in}^2$  の面記録密度に対応するために  $25\text{nm}$  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感度よく検出できるのかという問題がある。このため、近接場による光再生も再登場する可能性がある。

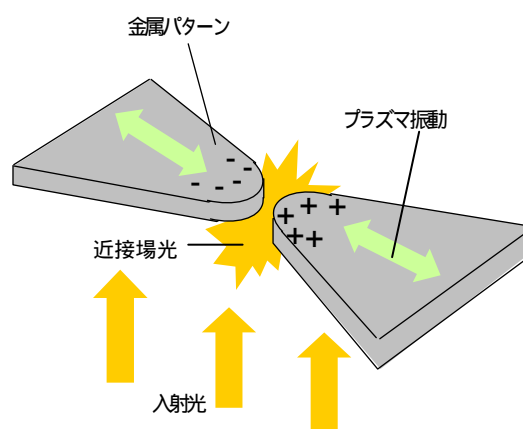


Fig. 13 ボウタイアンテナ

#### 4. 終わりに

この小文では、磁気ストレージ、光ストレージの高密度化の現状と研究状況を紹介するとともに、ハードディスクの超常磁性限界を突破し面記録密度  $1\text{Tb/in}^2$  をめざす技術として注目されるハイブリッド磁気記録(熱アシスト磁気記録)を中心に最近の動きを解説した。ハイブリッド記録には、近接場記録技術など、実際のシステムとして実現するまでには、解決すべき多くの課題があることがわかる。

#### 参考文献

- <sup>1</sup> <http://www.sonyshop-yoshida.co.jp/blurraydisc.html>
- <sup>2</sup> <http://www.aist.go.jp/sangi/28.html>
- <sup>3</sup> E.N. Abarra, A. Inomata, H. Sato, I. Okamoto, Y. Mizoshita: Appl. Phys. Lett. **77**, 2581 (2000)
- <sup>4</sup> 猪又明大, E. Noel Abarra, B.R. Acharya, 岡本巖:「層間交換結合を有する面内磁気記録媒体」: 日本応用磁気学会第 118 回研究会「 $100\text{Gb/in}^2$  時代の磁気記録」(2001.2.1-2) p.87.
- <sup>5</sup> 三浦義正:「超高密度磁気記録の現状」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.1
- <sup>6</sup> NE On Line 2003.4.2
- <sup>7</sup> NE On Line 2003.4.23
- <sup>8</sup> 日経エレクトロニクス 2004 年 01 月 19 日号 (No.865)
- <sup>9</sup> 伊藤彰義:「最先端光磁気記録技術」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.31
- <sup>10</sup> M. Moribe, M. Maeda, H. Nakayama, M. Yoshida, and K. Shono: *Digest ISOM'01, Th-I-01, Taipei, 2001.*
- <sup>11</sup> S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: J. Magn. Soc. Jpn. **23**, Suppl. S1 (1999) 173
- <sup>12</sup> J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano and N. Atoda: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 957.
- <sup>13</sup> H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, and N. Ohta: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 4257.
- <sup>14</sup> 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.
- <sup>15</sup> T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *Proc. MORIS1997*, J. Magn. Soc. Jpn. **22**, Suppl.S2 (1997) 47.
- <sup>16</sup> 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.
- <sup>17</sup> AV watch 2004.1.8 (<http://www.watch.impress.co.jp/av/docs/20040108/sonyl.htm>)
- <sup>18</sup> E. Betzig, J.K. Trautman, R. Wolfe, E.M. Gyorgy, P.L. Finn, M.H. Kryder and C.-H. Chang: Appl. Phys. Lett. **61** (1992) 1432
- <sup>19</sup> S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsune, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita and S. Kammer: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 443.
- <sup>20</sup> S.M. Mansfield and G. Kino: Appl. Phys. Lett. **57** (1990) 2615.

- 
- <sup>21</sup> B. D. Terris, H.J. Mamin and D. Ruger: *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 141.
- <sup>22</sup> B.D.Terris, H.J. Mamin, D. Ruger, W.R. Studenmund and G.S.Kino: *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994) 388.
- <sup>23</sup> P. Glijer, T. Suzuki, and B. Terris: *J. Magn. Soc. Jpn.* **20** Suppl.S1 (1996) 297.
- <sup>24</sup> 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
- <sup>25</sup> H.Nemoto, H. Saga, H. Sukeda and M. Takahashi: *Proc. MORIS1999*, *J. Magn. Soc. Jpn.* **23**, Suppl. S1 (1999) 229.
- <sup>26</sup> H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima and K. Ohta: *Proc. MORIS1999*, *J. Magn. Soc. Jpn.* **23**, Suppl. S1 (1999) 233.
- <sup>27</sup> J.J.M. Ruigrok: *Proc. MORIS2000*, *J. Magn. Soc. Jpn.* **25** (2001) 313
- <sup>28</sup> H. Saga, H. Nemoto, H. Sukeda, and M. Takahashi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 1839
- <sup>29</sup> H.Nemoto and H. Saga: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 6379.
- <sup>30</sup> H. Sukeda, H. Saga, H. Nemoto, Y. Itou, C. Haginoya, T. Matsumoto: *IEEE Trans. Magn.* **37** (2001) 1234.
- <sup>31</sup> T.E. Schlesinger, T. Rausch, A. Itagi, J. Zhu, J.A. Bain, D.D. Stancil: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) 1821.
- <sup>32</sup> F. Isshiki, K. Ito, K. Etoh, S. Hosaka: *Appl. Phys. Lett.* **76** (2000) 804.
- <sup>33</sup> 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.
- <sup>34</sup> R.D. Grober, R.J. Schoelkopf, D.E. Prober: *Appl. Phys. Lett.* **70** (1997) 1354.
- <sup>35</sup> 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