

高密度ストレージ技術

High-Density Recording Technology

あらまし

マルチメディアの普及により、処理される情報量は、爆発的に増大しており、その情報の記憶装置として、磁気ディスク装置や光磁気ディスク装置などが日常生活の中で利用されるようになってきている。これらの記憶装置では、記録媒体上の磁化として情報が記憶されており、その磁化情報の書き込み、読み出しの手法によって、電気・磁気変換を利用した磁気ディスク装置と電気・光変換を利用した光磁気ディスク装置に分類されている。それぞれの装置では、小型高性能で廉価な装置の要求が高く、この要求に応える技術として、高密度に効率よく記憶する高密度ストレージ技術が重要視され、開発が進められている。

本稿では、磁気ディスク装置および光磁気ディスク装置での高密度ストレージ技術に対する富士通研究所の取組みを紹介する。

Abstract

The amount of information being processed by PCs has increased explosively due to the wide use of multimedia applications. This information is commonly recorded on magnetic disk drives and magneto-optic disk drives. These disk drives are classified according to the information read/write technology they use. Magnetic disk drives use electrical-to-magnetic data conversion technology, and magneto-optic disk drives use electrical-to-optical data conversion technology. Because of the high demand for high-performance, inexpensive, and compact disk drives, new technologies that enable even further increases in recording densities are continually being developed.

This paper introduces Fujitsu Laboratories' studies on high-density recording technology for magnetic disk drives and magneto-optic disk drives.



押木満雅（おしき みつまさ）

1974年学習院大学自然科学研究科博士課程了。同年富士通入社。以来、薄膜磁気ヘッドなど磁気記録の開発に従事。
ペリフェラルシステム研究所



庄野敬二（しょうの けいじ）

1982年東京工業大学電子物理学研究科博士課程了。同年富士通入社。以来、光磁気記録の開発に従事。
ペリフェラルシステム研究所光ディスクメディア研究部

まえがき

コンピュータの普及により、インターネットを通じての情報伝達や業務のオンライン化が日常化している。その中で取り扱われる情報量は、日に日に増大しており、その情報を蓄えておく記憶装置として、磁気ディスク装置や光磁気ディスク装置などが利用されている。これらの記憶装置では、円盤状の記録媒体上にコンピュータの電気信号と対応した磁化として情報が記憶されており、その磁化情報の書き込み、読み出しの手法により磁気ディスク装置と光磁気ディスク装置に分類されている。磁気ディスク装置では、電気・磁気変換に電磁誘導効果や磁気抵抗効果などを利用、また、光磁気ディスク装置では電気・光変換にKerr効果を利用した読み出しを行っている。

媒体上で記録情報の最小単位(bit)の平面的なサイズは、最近の磁気ディスク装置では、 $0.09\mu\text{m} \times 1.4\mu\text{m}$ 程度であり、また、光磁気ディスク装置では $0.29\mu\text{m} \times 0.9\mu\text{m}$ 程度となっている。このサイズを縮小することができれば、媒体上により多くの情報の記録が可能となり、装置の小型化、大容量化が促進されることになる。そのためそれぞれの分野で、高密度に効率よく記憶する高密度ストレージ技術の開発が進められている。

本稿では、磁気ディスク装置での読み出しに利用している薄膜磁気ヘッド、および光磁気ディスク装置の高密度記録方式に対する取組みを紹介する。

記録密度の向上

磁気ディスク装置および光磁気ディスク装置における記録面密度(bit/in^2)は、富士通の最新磁気ディスク装置：Allegro-5では、 $3.7 \times 10^9 \text{ bit}/\text{in}^2$ であり⁽¹⁾、また、光磁気ディスク装置：GIGAMOでは、 $2.5 \times 10^9 \text{ bit}/\text{in}^2$ と両者ほぼ同じような面記録密度に達している。富士通製品の磁気ディスク装置および光磁気ディスク装置における面記録密度の推移を図-1に示した。

光磁気ディスク装置の面記録密度は、1980年に $5 \times 10^8 \text{ bit}/\text{in}^2$ の高密度ではじまり、約15年間ほぼ一定であったが、1994年頃より、年率50%で上昇を始めた。一方、磁気ディスク装置では、1970年頃は、 $2 \times 10^6 \text{ bit}/\text{in}^2$ の低面記録密度であったが、年率30%程度の向上を継続し、さらに、1993年より年率60%へと向上率が急激に進展している。磁気ディスク装置は、この急激な記録密度向上により、光磁気ディスク装置の面密度に追いつき、引き離しつつある。

高密度ストレージ技術の研究

磁気ディスク装置および光磁気ディスク装置における記録密度の向上には、情報を記録する高密度ストレージ技術の改良が重要な役割を果たしている。

本章では、高密度ストレージ技術のポイントである、磁気ディスク技術での情報の書き込み、読み出しを行う薄膜磁気ヘッドおよび光磁気ディスク技術での記録媒体改良についてそれぞれ解説する。

磁気ディスク技術

薄膜磁気ヘッドは、コンピュータの電気情報を記録媒体に書き込み(記録)、読み出す(再生)素子であり⁽²⁾、書き込みヘッドと読み出しヘッドが対になった積層構造をとり、半導体と類似した製造プロセスで製作される。薄膜磁気ヘッド構造のイメージを図-2に示した。書き込みヘッドでは、コンピュータ情報に対応した磁界を発生し、媒体を磁化させ情報を記録する。一方、記録された情報を読み出す場合、その磁化の発生する磁界を読み出しヘッドで電気信号に変換し、コンピュータでの処理可能なデータとしている。現在、読み出しヘッドには、スピナルブ素子が使用されている^{(3),(4)}。スピナルブ素子は、図-3に示したように、数nm(数十)の極薄膜の積層膜で構成された素子である。一対の強磁性層の磁化相対角度変化で電気抵抗が変化する巨大磁気抵抗効果(G-MR: Giant Magneto Resistive Effect)を利用して、媒体上の磁気情報を読み出している。

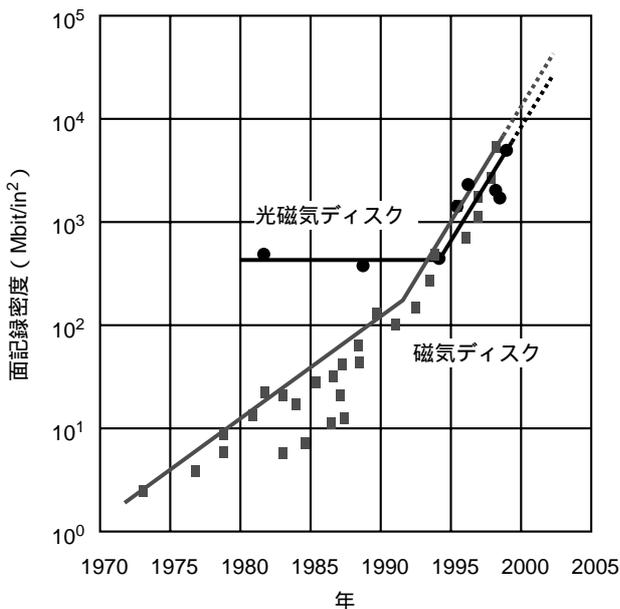


図-1 記録密度の推移

Fig.1-Trend of recording density for hard disk drives and magneto-optical disk drives.

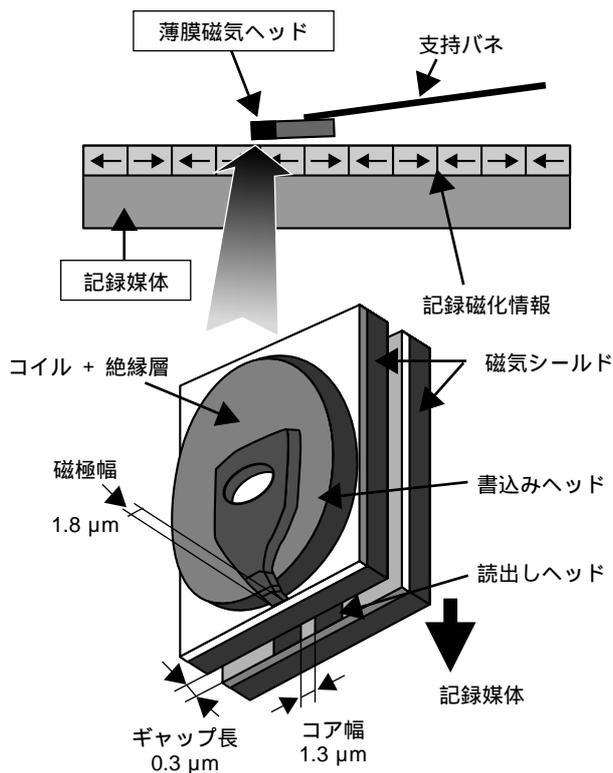


図2 薄膜磁気ヘッド
Fig.2-Thin film head.

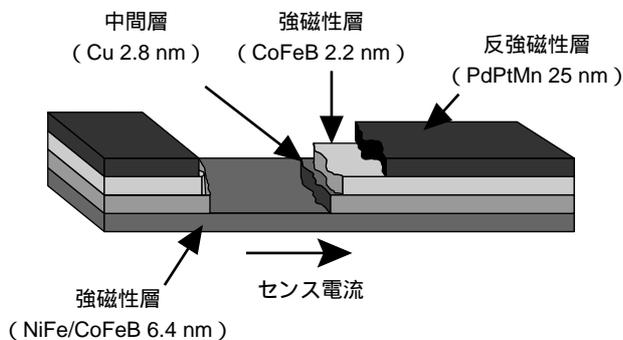


図3 スピンバルブ素子
Fig.3-Spin valve element.

薄膜磁気ヘッドは、記録媒体の回転に伴う空気流を受け、媒体表面より約50 nmの空隙を持って浮上している。図-2で、記録媒体表面の矢印は薄膜磁気ヘッドで書き込まれた磁化を示している。このヘッドは、すでに1999年1月より出荷されている磁気ディスク装置：Allegro-5(3.5インチディスク10枚使用、36 Gバイト)に採用されている(図-4)。

さらなる高密度記録情報の読み出しに対して、より高抵抗変化(高再生出力)を示すスピンバルブ膜が要求され



図4 磁気ディスク装置：Allegro-5
Fig.4-Magnetic disk drive：Allegro-5.

ている。著者らは、高性能スピンバルブ膜の開発を目指し、従来と比較して約2桁高い真空度での薄膜形成、積層を試みた。真空度の改善により、各薄膜界面での残留ガス影響の低減が図られ、結晶性および結晶(111)面の膜面内での配向性がそれぞれ向上した。その結果、従来のものと比較して約2倍大きな抵抗変化を持つ高性能スピンバルブ膜を形成することに成功した。この高性能スピンバルブ膜を使用することにより、容量が従来比8倍以上の磁気ディスク装置実現の見通しを得た。⁽⁵⁾

光磁気ディスク技術

3.5インチ光磁気(MO：Magneto-Optical)ディスク装置は、書換え可能で大容量かつ高信頼なパーソナルファイルとして、急速に普及してきている。MOディスク装置では、垂直磁化を示す記録媒体にレーザービームを用いて磁気情報を書き込み、読み出しは、ビームの偏光面が磁化の向きによって変化する、いわゆるKerr効果を利用している。MOディスク装置の記憶容量は1991年の128 Mバイトから始まり、230 Mバイト(1994)、640 Mバイト(1996)と増大している。640 MバイトMOディスク装置の記録面密度は 1.2×10^9 bit/in²で、磁気ディスク装置とほぼ同等の値となっている。メディア交換が可能なりムーバブルメディアでは、下位互換性(以前の低記録密度装置の媒体利用が可能)が重要であるため、MOでは下位互換を維持しながら大容量化が図られている。すなわち、640 Mバイトの装置は128 Mバイト、230 Mバイトのディスクを読み書きできるよう配慮されている。

光ディスクの記録密度は原理的には光の回折限界で決

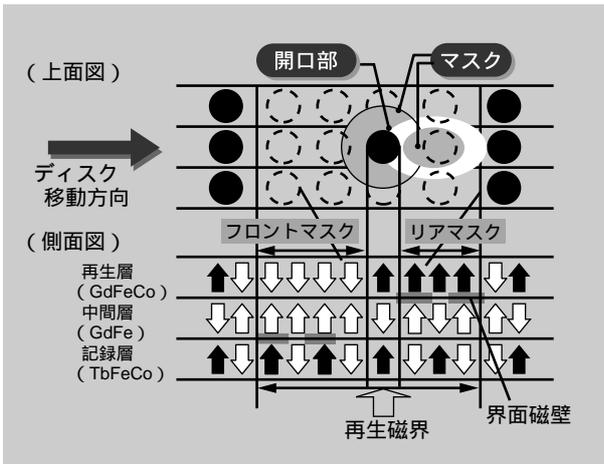


図-5 MSR(磁気超解像)方式
Fig.5-Magnetically-induced super resolution.

まっている。これは集光されるレーザービームのスポット径が λ/NA (λ は波長, NA は対物レンズの開口数) で表され、このスポット径サイズ以下の記録マークを識別できないことによる。640 Mバイトディスクでは、現在の半導体レーザー(波長685 nm)と対物レンズ($NA = 0.55$)を用いたほぼ限界の容量になっている。

さらに記録密度を上げるには、レーザー波長を短くするなどの光学系の変更が必要である。しかし、光学系を変更すると、下位互換を維持することが難しくなる。また、装置の大幅なコストアップにもつながり、富士通では光学系を変更せずに大容量化する手段としてMSR媒体を開発し、世界で初めて実用化した。

MSRはMagnetically-induced Super Resolution(磁気超解像)の略語であり、その原理を図-5に示した。MSRでは、記録媒体の材料や膜構成を工夫することによって、ビーム径を実効的に小さくしたと同じ効果である高分解能化を達成することができた。

従来の記録媒体では記録層である垂直磁化膜の1層のみを用いていたが、MSR媒体では互いに磁氣的に結合した3層の磁性膜を用いた。回転するディスクにレーザービームが照射されると、ビームスポットの前方部分では温度が低く、後方になるほど温度が高くなる。この温度分布と磁性膜の磁気特性を組み合わせることによって、ビームスポットの前方と後方では再生層の磁化が一方に揃った状態(磁気マスク)が形成される。すなわち、マスク部分での再生層の磁化の向きは、記録層の磁化の向きに依存せず、一方、ビーム中心の開口部では、再生層の磁化は記録層と同じ方向を向いており、記録層に書かれた情報を忠実に再現している。

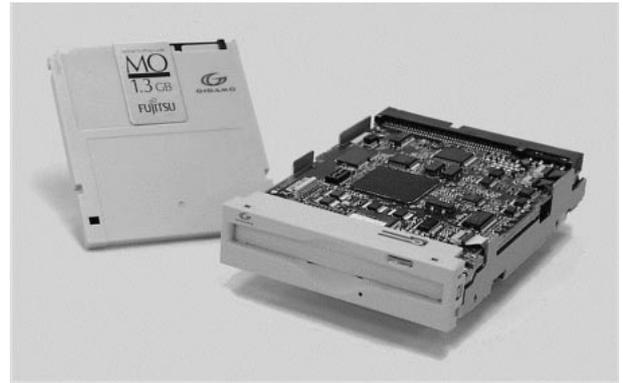


図-6 光磁気ディスク装置 : GIGAMO
Fig.6-Magneto-optical disk drive : GIGAMO.

MSRにはいくつかの方式があるが、ビームスポット内に二つのマスクを持つ、図-5に示した方式(ダブルマスクMSRという)が最も高密度化に適している。ダブルマスクMSRでは磁気マスクを形成するための磁界(再生磁界)が必要であるが、この磁界は 350 Oe ($O_e = 1,000/4 \text{ A/m}$) 以下であるため、書き込みの際に用いるバイアス用電磁石で代用することが可能である。ダブルマスクMSRは1991年にSONY社によって4層構成のものが提案されていたが、数kOeと大きな再生磁界が必要であった。⁽⁶⁾ 富士通は構造を3層に簡素化するとともに、再生時の必要磁界を大幅に低減することに成功した。⁽⁷⁾

ダブルマスクMSRは1.3 Gバイト容量のGIGAMO(ギガモ)に採用され、1999年2月から市場に投入されている。GIGAMOは富士通とSONY社が共同提案した3.5インチMOディスクシステムの規格名であり、事実上の業界標準となっている。GIGAMO装置とメディアを図-6に示した。640 Mバイトディスクでは最短ビット長は $0.49 \mu\text{m}$ 、トラックピッチは $1.1 \mu\text{m}$ であったが、1.3 Gバイトディスクでは最短ビット長 $0.29 \mu\text{m}$ 、トラックピッチ $0.9 \mu\text{m}$ となっている。記録エリアについては、従来と同じランド部を使うランド記録方式が採用されている。転送速度は640 Mバイトの4.9 Mバイト/秒から5.9 Mバイト/秒に向上しており、GIGAMOでは光学系やトラッキング方式が従来と同じであるため、下位互換を保持したまま高密度化を達成した。

さらに記録密度を上げる方法としては、MSRとランド/グループ記録の組合せがある。MO媒体では、光学ヘッドを記録トラックに追従させるため、トラックピッチに対応した案内溝(グループ)があらかじめ設けられている。記録トラック部をランドと呼んでいるが、ランド/グループ記録とは、従来のランド部だけでなくグループ部にも記録

する方式であり、これによってトラックピッチを $0.6\mu\text{m}$ 程度に縮めることが可能となる。MSRとランド/グループ記録を用いると、光学系を大幅に変更することなく、下位互換も保ちながら、2.6 Gバイトを実現できることを確認した。⁽⁸⁾

2000年以降になり青色半導体レーザー(波長400 nm付近)の使用が可能になると、トラックピッチを更に詰めることができ、MSRとランド/グループ記録の組合せで、3.5インチディスク片面で5 Gバイト以上の容量が可能になると予想される。

む す び

高密度ストレージ技術について、磁気ディスク技術および光磁気ディスク技術の二面から技術の現状を述べた。現在も、それぞれの技術の改良が進められ、年々、記録密度が更新している。著者らは、高密度ストレージに対する新たなアプローチに取り組んでいる。それは、磁気ディスク技術と光磁気ディスク技術との両者の利点を相互に利用した融合技術である。両技術の融合した、超高密度ストレージ装置の実現を目指している。

今後の情報化社会の伸展に従い、ストレージビジネス規模も更に膨らんでいく。ストレージビジネスを支える、根幹技術である高密度ストレージ技術の開発を更に促進させる所存である。

参考文献

- (1) 関野：サーバ用高性能ハードディスク．FUJITSU．50，1，pp.22-27(1999)
- (2) 押木：MRヘッド．固体物理，31，9，pp.805-812(1996)
- (3) 富士通研究所ホームページ：やさしい技術講座「磁気ディスク装置」．<http://www.fujitsu.co.jp/hypertext/flab/gijutsu/jiki/homepage.html>
- (4) 松崎：ハードディスク用磁気ヘッドの現状と将来．応用物理，68，1，pp.62-67(1999)
- (5) A. Tanaka et al. : Top, bottom, and dual spin valve recording heads with PbPtMn antiferromagnets . *IEEE Trans. Magn.*, 35, pp.700-705(1999)
- (6) M. Kaneko, K. Aratani and M. Ohta : Multilayered Magneto-Optical Disks for Magnetically Induced Super resolution. Proc. Int. Symp on Optical Memory , 1991 , *J. Appl. Phys . Series 6* , p.203(1991)
- (7) K. Matsumoto et al. : Very High-Density Recording on Exchange-Coupled Trilayer Magnetically Induced Super Resolution Media without Special Initializing Magnet. *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 , p.L144(1996)
- (8) T. Tanaka et al. : Probable Capacity of 3.5-Inch Magneto-Optical Disk Using Trilayer Double-Mask Magnetically Induced Super-Resolution Media. *IEEE Trans. Magn.* , 35 , pp.580-582 (1999)