

ディスク型記録装置の研究動向

Trend of research in disc type recording system

伊藤 寛

Hiroshi Itoh

要 旨 ハードディスク駆動装置(HDD) 光および光磁気(MO)ディスク装置などの高密度化の発展について述べる。記録密度の上限は、一般的に 磁気記録媒体では熱揺らぎによって引き起こされる記録ビットの劣化による。一方、光記録においては光の回折限界がその制限を受ける。研究はこれらの望ましくない効果をいかに克服するかに焦点をおいてきた。具体的には、前者は超常磁性限界として知られる。この限界を押し退けるために、反強磁性結合の記録媒体が開発された。この記録媒体を高感度巨大磁気抵抗(GMR)効果型ヘッドと組み合わせることによって、100Gbits/in²を超える面記録密度が実験室レベルで得られた。一方、高密度光および光磁気(MO)ディスク装置においては、近接場光記録、電子ビームマスタリングおよび超解像現象などの新規な技術が、光の回折限界を克服するために広範囲に研究されている。CDサイズディスクに23GB以上(2層ディスクではその2倍)の記録容量を蓄積できる次世代DVD装置が、青紫色半導体レーザと高い開口数のレンズを用いて開発された。幾つかのディスク型記録を満たす小型装置がデジタル静止画カメラや車載用途(PDA)として開発されている。

Summary The author reviewed the research evolution in the recording density represented by hard disk drive (HDD), optical and magneto-optical (MO) disc drives and so on. In general, decay of recorded bits caused by thermal fluctuation in the magnetic recording media shall limit the upper density in the HDD, while light diffraction limit is the restriction for the optical recording. Research has been focused on how to reduce these unwanted effects. More specifically, the former is known as superparamagnetic (SPM) limit. The antiferromagnetic-coupled(AFC) media have been developed to push the SPM limit further. Combing such AFC media with a high sensitive giant magnetoresistance (GMR) head, the areal density of over 100Gbits/in² was obtained experimentally. On the other hand, in the development of the high density optical/MO disc systems, new technologies such as near-field optical recording, electron-beam mastering and super-resolution phenomenon have been extensively studied to overcome the light-diffraction limit. The next generation digital versatile disc(DVD) system, which can store over 23GB(twice that 2 times in dual layer) capacity in a CD size disc, has been realized using both a blue-violet laser diode and a high numerical aperture (NA) lens. Small drives implementing some kind of the said disc recording system have been developed for use in digital still camera and mobile equipment (PDA).

キーワード：ハードディスク装置、光ディスク、光磁気ディスク、近接場光記録、電子ビームマスタリング、超解像、超常磁性、磁気抵抗効果、回折限界、DVD、青紫色レーザー、対物レンズ、記録容量(記録密度)相変化記録

1. まえがき

インターネットのブロードバンド化に伴い、各家庭へのマルチメディア情報(デジタルコンテンツ)の流入が増加している。デジタル化の波は、放送分野にも波及し、通信衛星(CS)放送は既に1996年に始まり、放送衛星(BS)デジタル放送も2000年12月から放送されるようになった。これにより、デジタルハイビジョンによる高品質な画像が配信されるようになり、様々な情報を視聴者が自由に調べることができるデータサービスも可能になった。さらに、ビデオ情報もデジタル化されることによって、世の中のあらゆる情報がマイクロプロセッサ(MPU)で処理され、ネットワークを通じて瞬時に世界中を行き交うことが可能になった。

これらの音声・映像情報を高速に処理する情報記録方式(装置)として、ハードディスクドライブHard disk Drive(HDD)、光ディスク、光磁気(MO)ディスク、VTR、半導体メモリなどがある。これらの情報記録装置の研究開発に共通した目標は、大容量化、データ転送レートの高速度化、小型化および低価格化である。光ディスク装置やVTRは、規格に則った互換性を有する機器であり、光ディスクやVTRテープは互換性を必要とするパッケージメディアである。一方、HDDは、規格にとらわれることなく筐体内で閉じた系である。このためHDDにおいては、規格に左右されることなく最先端技術を導入して高密度化を促進しやすい環境にあると思われる。

最近、HDDにおいては、近年面記録密度が年率100%の伸びを示し、実験室レベルで100Gbits/in²を越えている。それ以降、数百Gbits/in²から1Tbits/in²に向けた要素技術開発や磁気記録方式(面内と垂直磁気記録方式)の検討が進められている。HDD搭載のカーナビゲーションやHDDレコーダのような音声映像機器などへの新しい応用が進

んでいる。一方、光ディスク装置においては、短波長用GaN系青紫色半導体レーザー(405nm)も実用的な出力30mW、動作寿命15000時間に達し、これを用いた高精細なハイビジョン映像を直径12cmサイズのディスクに2時間以上録画することができる書き換え型次世代DVD装置(記録容量21GB以上)の開発が進んでいる。また、記録層膜をディスク片面に2層構造にして最大50GBの記録が可能な相変化光ディスクも開発された。そこで、以下、操作の簡便性・ランダムアクセス性に利点を持つ各種ディスク型記録方式装置研究の現状とその動向を述べる。

2. ハードディスクドライブ(HDD)⁽¹⁾

HDDは、IBM社が1957年に名称RAMACで電子計算機の補助記憶装置として開発された。当時は24インチ(約60cm径)の磁気ディスクを50枚重ねた大型サイズで記録容量も僅か5MB(Mega Byte)であった。その後、1960年頃からの30年間HDDの高密度化は徐々に増加した。1992年以降、磁気抵抗、Magnetoresistance(MR)型再生ヘッドの採用によって、高密度化は更に急速に進み、年率60%(5年間で10倍)の増加となり、最近の数年、Giant MR(GMR)ヘッドが採用された)では年率100%を超えている。

図1は、HDDの面記録密度の推移⁽²⁾を示す。HDDの製品と実験室レベルの推移を半導体デバイスDRAM(セル面積当たりの換算値)と共に示す。最近では、実験室レベル値の発表後1-2年の間には、同じ面密度の製品が市場に出ていることがわかる。HDDの面記録密度は、ムーアの法則(半導体の集積度が18ヶ月で2倍に増加)に従うDRAMの伸びを越えている。現在、製品レベルのHDDでは最大で40Gbits/in²であり、2003年頃には、100Gbits/in²の面記録密度が実現すると予想されている。これが実現すると、3.5インチ径で400GB、2.5インチ径で200GBそして1インチ径マイクロドライブでは6GB容量が可能になり、PDA(携帯情報端末)な

どの画像圧縮方式MPEG - 4利用でビデオ13時間分(映画8本分)に相当する記録密度となる。主なHDDのディスク径として3.5 ,2.5 ,1.8 ,1インチがある。

近年のHDDの著しい面記録密度の増加は、磁気ヘッドと記録媒体の間隙の低減、新規な信号処理方式の採用による線記録密度の向上および狭トラック化によるトラック密度の向上に主による。

線記録密度を増加させるためには、記録ビットの微細化が必要で、このことは記録媒体の熱揺らぎの問題を顕在化させる。狭トラック化による再生出力とSN比の低下を抑えるために、大きな磁気抵抗(MR)効果が得られるGMRヘッドがHDDに採用された。近年、MR比を一層高めるために、GMRスピナルブ膜の積層構造に改良(極薄のスペキュラー:鏡面反射層の導入)が加えられた。今後、数百Gbits/in²の面記録密度を実現するために、磁気ヘッドの狭トラック化に伴い0.1μm以下の超微細加工技術の開発が急務である。

2.1 媒体の熱揺らぎ対策

高記録密度化のために、媒体に求められる技術項目として、媒体保磁力の増大、ノイズ低減のために結晶粒の微細化および磁気的な相互作用の低減がある。結晶粒内の各原子の磁化が同一方向に整列するには、ある一定量の磁性体積Vが必要で、この値がしきい値以下になると、強磁性体の磁化は熱エネルギーkT(k:ボルツマン定数、T:絶対温度)により記録磁化状態を保てなくなる超常磁性限界(Superparamagnetic limit)が生じる。この課題を解決するために、磁気異方性エネルギーKuの大きな媒体を用いる(即ちKuV>kT)方法と記録媒体を多層化して反強磁性結合(AFC:Antiferromagnetic coupling)を取り入れた記録媒体が提案された。実際、これらの記録媒体の開発によって、元来、40Gbits/in²あたりで制限を受けるといわれてきた面記録密度も、最近では、300Gbits/in²程度まで押し上げられつつある。それ以降は、より熱揺らぎに強いと言われる垂直磁気記録方式の

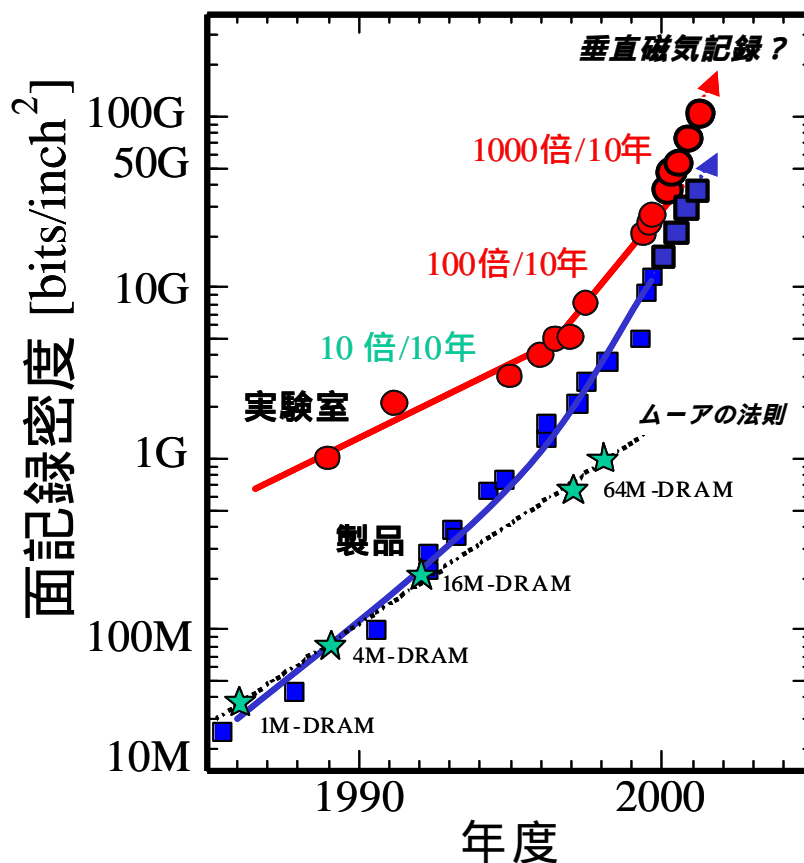


図1 面記録密度の向上

採用やパターンドメディアの開発などが提案されている。

近年の熱揺らぎ耐性を最も効果的に高めたAFC媒体は、記録層を極薄のRu層を間に挟んで、2層構造に積層させることによって隣接する磁性層間に反強磁性結合を導入して記録ビットに働く反磁界を減らし、高い記録密度においても磁化方向の熱的安定性を高めたものである。この場合、多層構造体の膜厚が実際よりも見かけ上薄くなり、微少なビットが容易に記録媒体内に安定に記録できるようになった。

富士通⁽³⁾は、CoCrPt系記録膜にAFC構造を取り入れた記録媒体積層フェリ磁性結合媒体(SFMメディア: Synthetic Ferri-coupled Media)を開発し、さらに、酸化物の2重鏡面反射膜構造のダブルスペキュラー型スピバルブ膜⁽⁴⁾を導入したGMR型スピバルブヘッド(再生出力9.3mV/ μm , GMR比12%)を作製して従来⁽⁵⁾の面内記録において、106Gbits/in²(16.4Gbits/cm²)の高い面記録密度を達成した。記録ヘッドには、162nmのトラック幅を持ち高飽和磁束密度の軟磁性材料が用いられた。磁気的間隙は12nmであった。

2.2 垂直磁気記録方式

面内磁気記録方式のHDDにおいては、3.5インチ径で170GB相当の面記録密度130Gbits/in²達成⁽⁵⁾の報告もあり、既存のGMRヘッドでも改良により200Gbits/in²以上も可能との意見もある。今後、1Tbits/in²に向けたHDDの超高記録密度化においては、面内磁気記録方式から垂直磁気記録方式に移行するものと言われている。学会レベルでは、面内磁気記録と垂直磁気記録の両方のシステムにおいて総合比較検討が既に始まっている。

日立製作所⁽⁶⁾は、最近、垂直磁気記録とトンネル磁気抵抗(TMR: Tunneling Magnetoresistance)型ヘッドという新技術を導入し、107Gbits/in²(線記録密度706kBPI, トラック密度152kTPI)の記録再生実験を行っている。0.1 μm 程度の超微細な再生トラック幅を持つTMRヘッドを用い、高い出力感度(0.7mAのセンス電流に対して5mVの出力感度)を得ている。垂直磁気記録用ヘッドの

製作には電子線描画装置が採用されている。

垂直磁気記録方式では、次世代用再生ヘッドとして、TMRヘッドや膜面に垂直方向に電流を流す(CPP: Current-Perpendicular-to-Plane)型GMRヘッドの研究開発が活発になっている。TMR素子では抵抗値の低減、そして垂直磁気記録媒体のノイズ低減化が大きな課題となっている。磁気記録方式の記録/再生ヘッドのトラック幅も0.1 μm オーダまで微細化してきていて、今後、さらなる微細加工技術の開発が望まれる。

2.3 パターンドメディア

半導体微細加工技術を用いて、今後、1ビットを記録する磁性粒子を形状、大きさおよび位置を揃えたパターンドメディアが将来の記録媒体として注目されている。これは、磁性粒子の磁気的な孤立化を図り、媒体ノイズを低減し、高いSN比を得ることを目標にしている。現在、Si基板上に電子線露光とArイオンエッチング技術を用いて試作実験が行われている。現在、2.5mm直径のディスク上に直径50nmのCo合金単磁区微粒子が80nmピッチで形成⁽⁷⁾されている。

2.4 データ転送レートの高速度化

データ転送レートは、年率40%で増加していて、現在100MB/s程度まで達している。これはディスク回転速度の増大に大きく寄与し、現在は10000rpm(Rotation per minutes)であり、2005年には20000rpm程度まで増加し、対応するディスクコントローラ間のデータ転送速度も現在の400Mbpsから2005年には2Gbits/s(Gbps)程度まで増加すると予測される。それ以降は、高周波記録限界を受け、ディスクの小径化が進むと見られる。今後の課題として、大規模集積回路(LSI)の発熱と周波数帯域の広がりによるノイズ増大の抑制がある。

2.5 機構系と耐衝撃性

高精度の位置決めと浮上量低減のために、2段アクチュエータの開発やディスク表面の平滑性が要求される。この場合、磁気ヘッドと媒体表面の吸着を防ぐために、スライダの浮上面に微小パッドを設けたり、非使用時に磁気ヘッドを回転

しているディスク面から外側に待避させるヘッドロード/アンロード方式が必須となる。更に、磁気ヘッドと信号処理用IC間の設計(配線一体型サスペンション)の工夫が必要になる。低振動化と静穏化のために、高速回転のスピンダルモータには従来の玉軸受け型から動圧流体軸受け型が主に用いられている。

3. 光ディスク装置

光ディスク装置では、再生専用型{CD-ROM, DVD-ROMなど}追記型(CD-R, DVD-R), 書換え可能型(CD-RW, DVD-RW, DVD+RW, DVD-RAM, MO, MD)に大きく分類される。映像情報を配布する媒体としてビデオディスクが1981年に現われ、直径20-30cmとやや大きい光学式ビデオディスクが検索性に優れるため、映画やカラオケなどの再生用に使われた。ビデオディスクに代わり、1996年末120mm径で記録容量が4.7GB(片面)のDVD-Videoが現われ、MPEG2-MP@ML信号が2時間以上デジタル録画された映画が楽しめるようになった。DVD-Videoは、CD-ROMの7倍程度の記録容量をもつ。

DVD規格としてROM, R/RW, RAMがあり、アプリケーション規格としてDVD-Video, DVD-Audio, DVD-Video Recording規格があり既に市場投入されている。既存の光ディスク装置では、ディスクへの高速(倍速)記録が進んでいる。CD-Rディスクの記録速度では40倍速が実現している。

(社)電子情報技術産業協会(JEITA)が2002年4月に行った「光ディスク関連機器に関するユーザ利用動向調査」⁽⁹⁾によれば、今購入したい光ディスク装置として、DVD-Writableが49.7%, CD-RWが23.5%, MOが14.5%, DVD-ROMが10%などと報告されている。このように、記録可能な大容量DVD装置の要望が非常に高いことがわかる。

現在、光ディスク装置開発の目標は、以下にふれるように青紫色レーザ波長405nmと0.85のレンズの開口数Numerical Aperture(NA)対物レンズを用い、相変化媒体をグループ部に形成し、厚み0.1mmのカバー層を用いて、DVD-ROM型と書換え型DVDレコーダの大容量化のための研究開発

が活発に行われている。

1998から5年計画で経済産業省の新規産業創出型産業科学技術研究開発制度によるプロジェクト「ナノメータ制御光ディスクシステム」⁽⁹⁾が進行中である。これは、記録密度100Gbits/in²の大容量の光ディスクと光磁気ディスクシステムの実現を目指すもので、前者はパイオニアも参画し、電子線ビーム描画マスタリング技術、高密度レプリケーション技術(スタンパー、成形基板、成膜プロセスにわたる超精密光ディスク作製プロセス)および多値変調技術などの研究を行っている。後者は磁区応答3次元光メモリ技術グループとして、日本大学と電機メーカ(日立マクセル、三洋電機、シャープ、富士通)の共同で行われている。

一般に、光ディスクの記録密度は、光の回折限界で決まる光スポットサイズは $0.6 / NA$ で与えられ、短波長光源と高NAレンズを用いることで高密度化がなされてきた。しかし、レンズ光学系を用いる限り、光の回折限界から逃げることは出来ない。これを克服する技術として、近接場記録、超解像技術、光源に電子線を用いるマスタリング技術、および3次元記録(多層記録、ホログラフィックメモリ)などがある。

3.1 短波長化・高NA化/近接場記録

3.1.1 近接場記録⁽¹⁰⁾

近接場光とは、波長よりも充分小さい構造体に光を照射した時、そのごく近傍に近接場光と呼ばれる局所的な電磁場(空間を伝搬しない)が発生し、この近接場光(エバネセント光)を用いて記録する光記録方式で、原理上、数nmのビットサイズでTbits/in²級の記録密度が期待される。実際には、光ファイバーの先端を尖らせて作成した数nmオーダの微細開口やnmオーダで先鋭化した金属プローブの先端が用いられる。

近接場光記録の可能性は1992年Bell研のBetigら⁽¹¹⁾によって、最初に示された。データの記録に走査型近接場光学顕微鏡(SNOM: Scanning near-field optical microscope)のファイバープローブにパルス光を光磁気人工格子膜に照射し

て熱磁気記録を行い、再生はファイバースコープに偏光を入射して試料裏面からの透過光のファラディ効果によって行っている。直径60nmの記録ビットの記録再生を行い、45Gbits/in²程度の面密度が実現可能であることが示された。その後、ポリカーボネート(PC)基板の上に相変化媒体GeSbTeをZnS・SiO₂でサンドイッチした積層構造体⁽¹²⁾においても、この方式の有効性が示され、60nm径(170Gbits/in²相当)の記録の可能性が示唆された。

固体浸レンズ(SIL:Solid Immersion Lens)の高い開口数(NA)を持つレンズと近接場光を組み合わせ、HDDで用いられるヘッドスライダにレンズや微小開口を搭載した浮上型ヘッドで安定に走査する方式も提案された。青紫色半導体レーザー405nmと実効開口数1.5のSILレンズ(1mm)を用いた近接場光記録(グループ構造をもつ相変化記録媒体)において、45Gbits/in²(CDサイズで50GBに相当する)の面記録密度を持つROMディスク⁽¹³⁾が開発された。この場合、SILと光ディスク間の間隙50nmで制御され、線記録密度は80nm/ビット、記録媒体のトラックピッチ180nm、ランド・グループ記録を用いている。ディスク表面を平滑化するためにSOG(Spin-On-Glass)材料、そしてプリグループディスク基板の作製のために反応性イオンエッチング(RIE:Reactive Ion Etching)法が用いられている。

SNOMを利用した近接場光記録は、一般に、対物レンズと媒体の間隔を数十nm程度に近接する必要があり、高いSNが得られにくい、媒体可換性が保持しにくい、データ転送速度が遅い、信頼性プローブ(衝突回避やゴミの除去)などの課題がある。

3.1.2 超解像技術(Super-RENS:Super-

Resolution Near-field Structure)^{(14),(15)}

HDDに用いられるヘッドスライダのようなヘッドと光ディスク媒体を近接させる必要のない近接場記録方式として、ディスク構造内に非線形膜の光学的な超解像現象(近接場プローブ)を取り込んだSuper-RENS方式が1998年に提案された。この方式は、従来の光ディスクと同じファー

フィールド型光ピックアップを使用でき、記録層と対物レンズの間に十分な間隙を保持したまま近接場記録を行うもので、可換性のある光記録方式として注目されている。記録媒体にGeSbTe膜を用い、超解像現象を起こす非線形膜として、開口透過型のSbと散乱型のAgOxが検討されている。開口型は微小開口が作りやすく、微小マークの検出に優れるのに対して、散乱型はAg微粒子による局所プラズモン生成(Ag微粒子の凝集による散乱体AgOxの透過)による電場増強による信号強度の増大効果が期待できる。現在、課題であるCN比の増大と繰り返し記録再生時の信号劣化の抑制に改善が進められている。最近、追記型Super-RENSが開発され、CN比44dB⁽¹⁶⁾が、2.5mWの再生パワーと150nmのマーク長で得られている。

3.2 高密度マスタリング技術

高密度マスタリング技術は、今後、25GB以上の超高密度な大容量光ディスクを開発するのに重要な技術と思われる。当初、遠紫外線光源(Deep-ultraviolet,266nm)によるレーザービームレコーダ(LBR)が開発されてきたが、近年、HDTVのデジタルデータを2時間以上録音するのに必要な記録容量21GB以上を得るために有利となる光の回折限界の制約を受けない電子線を用いたマスタリング技術(EBRマスタリング)が注目されている。

図2は、パイオニア⁽¹⁷⁾によって報告された電子ビームレコーダ(EBR)による高密度マスタリングプロセスの一例(25GB以上)を示す。現行のLBRによる4.7GB-DVDIは比較のために示される。次世代ディスク25GBおよび75GBの原盤作製マスタリングのピットパターンのSEM(Scanning electron microscope)像を示す。Tp(トラックピッチ)=100nm、Tmin(最短ピット長)=69nmの記録ピットパターン(201GB)も示されている。EBRによるピットサイズの微小化が明確に読み取れる。電子ビーム利用によるマスタリング原盤の高い解像度限界から200GB以上の大容量化の可能性をもつことがわかる。EBRマスタリングの課題は、従来スルーputが低いことであったが、現在、化学増強型レジストの使用により、レーザービームを用い

た(LBR)マスタリング技術(LBR)の速度まで改善されつつある。

パイオニア⁽¹⁸⁾は EBRマスタリングと射出圧縮成形法を用いてディスク1枚片面で50GBの記録容量となる2層ROMディスクを開発した。作製した単層記録容量25GBの透明樹脂を第2層(層1)とし、紫外線硬化樹脂を用いて第1層(層0)を転写する方式で作製している。信号再生には波長405nmの光源とNA0.85の対物レンズが使われ、信号変調方式は(1,7)変調、トラックピッチ300nm、最短ビット長は159nmである。

3.3 相変化ディスク

1995年4月に商品化された相変化型光ディスク装置(PD)以来、1999年に商品化された4.7GB/12cm径のDVD-RWまで、4年間で約7倍の容量になっている。記録媒体は、一般に金属反射層、誘電体層、相変化記録層および誘電体層という積層構造をとる。材料としてDVD-RAMではGeSbTe系化合物が、CD-RWやDVD-RWではAgInSbTeの共晶系が主に用いられている。

次世代DVDとして、相変化記録をベースとする高転送速度と大容量化の書き換え型光ディスクの研究開発が活発化している。

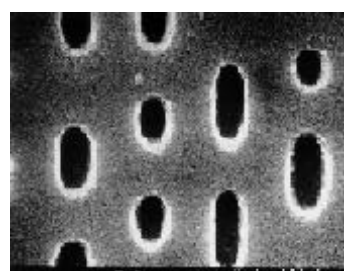
3.3.1 高速データ記録

TDKは $Sb_{30}Te_{70}$ 近傍の単一相にAg, Ge, Inを添加した材料系がデータ記録レートは140Mbps⁽¹⁹⁾をもつことを示した。これによって、ハイビジョンテレビ(HDTV)映像の記録が容易になる。この場合、SRC(Super-rapid cooling)構造による材料の再結晶化を用いている。波長405nm、NA0.85のピックアップを用いて、トラックピッチ0.3 μ m用いた記録膜はAgInSbTeGeで、1000回のオフライン記録回数(ジッター値:9%)が得られている。

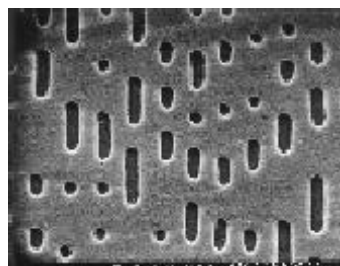
3.3.2 大容量化

青紫色半導体レーザと高NA(0.85)レンズを用いて、 ϕ Dサイズディスク片面に記録膜1層では記録容量23.3 - 25GBの光ディスク⁽²⁰⁾、⁽²¹⁾、そして、片面に記録膜2層では46 - 50GBの光ディスク⁽²²⁾、⁽²³⁾が、ROM型と書き換え型として開発された。

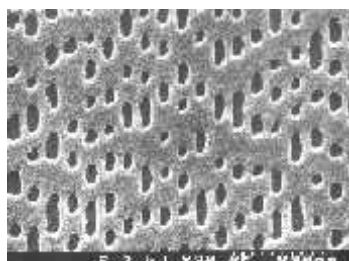
ソニー、TDKおよびパイオニアの例として、23.3GBディスクの場合、トラックピッチTp0.32 μ m、1ビット当たりの記録長0.112 μ m、0.1mmPCカバー層およびEBRマスタリング技術が用いられている。また、書き換え型の光ディスクにおいてROMディスクや多層膜ディスクと互換性をとりや



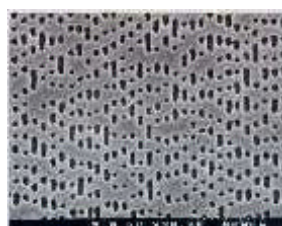
(a) 4.7GB (DVD)



(b) 25GB (Tp: 320 nm, Tmin: 149 nm)



(c) 75GB (Tp: 160nm, Tmin: 115nm)



(d) 201GB (Tp: 100 nm, Tmin: 69 nm)

図2 マスタリング原盤のビットパターン

すいグループ記録が注目されている。EBRマスターリングプロセスにおいて、トラックピッチをつめて高密度グループ記録を行う場合にプラズマエッチングプロセスとSRC構造の相変化媒体の併用がディスクノイズの低減とCN比の増大に有効であることが示された。

4. 光磁気(MO)ディスク

3.5 インチMOについては、1991年の第一世代の商品化から8年で面記録密度は6倍、記録容量では10倍となっている。

4.1 磁気超解像(MSR: Magnetically Induced Super Resolution)技術⁽²⁴⁾

現行の赤色レーザーで磁気超解像(MSR)技術を用いたMOディスクとして、GIGAMOシリーズ(3.5インチ径で記録容量1.3GBと2.3GB)と小径MOディスク(直径5cm、730MB) iD-PHOTO規格が実用化された。

4.2 近接場記録(短波長、高NA浮上ヘッド、併用)

青紫色レーザー405nmと高NAレンズの組み合わせによって、12cmディスクサイズで25GBの容量(1ビット当たりのビット長95nm)に相当する面記録密度20Gbits/in²⁽²⁵⁾が得られた。さらに、波長413nm、NA0.9の光学系とMAMMOS技術を組み合わせ、200nm周期に配列した0.1μm径の記録マークを高いCN比で再生出来、64Gbits/in²の高密度化⁽²⁶⁾の可能性が示された。

4.3 磁区拡大再生(MAMMOS: Magnetic Amplifying Magneto Optical System)技術⁽²⁷⁾

これは、光学系の解像度不足を記録膜の工夫により補い、ビームスポット径よりも小さな記録マークを読み出す技術である。小さな記録マークの信号を記録時の機能で増強し、これを光ピックアップで検出できることが特徴である。最近では、磁性膜の工夫により外部からの磁界なしで磁区を拡大させる(無磁界MAMMOS)⁽²⁸⁾ことを可能にした。赤色レーザー波長640nm、NA0.6の光学ヘッドを用い、0.6μm幅のランド・グルー記録で記録容量はCDサイズで12GBである。次世代iD-PHOTOの展開や外部磁界を用いない下位互換性のあるMOディスクへの応用が検討されている。

MAMMOSにおいて、外部磁界1100e印加時で80m/sの磁区拡大縮小速度が室温で得られている。これは波長405nm、NA0.9を用い、データ転送速度200Mbpsが可能と言われる。

4.4 磁壁移動検出(DWDD: Domain Wall Displacement Detection)技術⁽²⁹⁾

DWDDでは、光スポットにより媒体上に温度分布が生じた時隣接する磁区間に形成する磁壁が磁壁エネルギー密度を小さくしようと高温領域へ移動する性質を利用する。そのため記録媒体の熱応答性と各磁性層の制御が媒体設計上重要となる。0.6mm厚のガラス基板にRIE法によって115nmのグループ深さ、0.34μmのトラックピッチのランド/グループ部を形成し、DWDD構成の膜を形成し、波長405nm、NA0.6の光学系で評価し、20Gbits/in²、ランド/グループともジッター値15%以下⁽³⁰⁾が得られている。松下電器とキャノンは共同でDWDD技術を用いて2インチ型ディスクで3GB光磁気ディスク⁽³¹⁾を発表した。

5. 光ディスクと磁気ディスクの融合化

HDDの超高密度化の際の記録ビットの微小化に伴うSN比の改善や熱揺らぎ対策の一つとして、記録媒体に光磁気記録媒体を用いて熱磁気記録し、再生は高感度なGMR(MR)ヘッドを用いる光アシスト法の磁気記録技術が提案されている。記録媒体(記録層TbFeCo、再生層TbDyFeCo)を、青色レーザー400nmとSIL(実効的NA1.93)を組み合わせた光学系で熱磁気記録し、GMRヘッドで再生し、磁気力顕微鏡(MFM: Magnetic Force Microscope)による0.1μmの記録磁区観察から60Gbits/in²の面記録密度⁽³²⁾の可能性が示された。このように、記録時に光アシスト、再生時にGMRセンサーを用いる光アシスト法は、最近、米国ではHAMR(Heat Assisted Magnetic Recording)⁽³³⁾と呼ばれ、研究開発プロジェクトが始まっている。

垂直磁気記録が成し得る以上の記録密度を得るためには、HAMRやパターンドメディアが必要と言われる。恐らく1Tbits/in²以上の記録密度においてはディスク上に等しい大きさのビットを

12.5nmの大きさに孤立した島状に配列させねばならない。この磁性微粒子の配列方法として、微細加工法の他に材料の自己組織化を利用する方法も研究されている。

6. 新規情報記録方式

媒体の厚み方向の高密度化手法として、フォトンモードを基本とする多層記録とホログラフィック体積記録、そしてマルチプローブ記録や並列光源による2次元記録などがある。

6.1 フォトンモード記録・多層化⁽³⁴⁾

従来の光ディスクは、光エネルギーを熱として利用するヒートモード記録である。この方式では、材料の高感度化に限界があるので、これに代わる光子(フォトン)モード記録方式の開発が進められている。フォトンモードの材料として、光を吸収して吸収スペクトルが変化するフォトクロミック材料、光重合反応を生じるフォトポリマー、電子の局在化によって屈折率が変化するフォトリフラクティブ結晶がある。

2光子励起(吸収)過程などの非線形性を効果的に発生させるために、短時間に数多くの光子(フォトン)を発生させることができるフェムト秒レーザー光源⁽³⁵⁾を用いて、感光膜と透明バッファ層の交互多層膜からなる記録媒体に多層記録(記録間隔1.5 μm)し、データの再生には反射型共焦点光学系を取り入れたシステムが提案されている。フェムト秒レーザーでは、電界強度が非常に強いので、ビームが集光された箇所の近傍だけが空間選択的に多光子吸収の非線形な反応を引き起こす。2光子吸収過程を利用してデータを記録すると3次元空間の多くの点にデータを多層記録することが可能となる。フェムト秒レーザーを用いる光メモリでは記録媒体としてフォトンモード型が必要になる。この場合、小型で安価なフェムト秒レーザーの開発が望まれる。

フォトンモード記録の代表的なものに、光化学ホールバーニング(PHB)現象を用いるものがある。PHB材料として、記録媒体の光吸収スペクトルが特定の波長の光照射によって狭い波長範囲の吸収

率が減少することを利用する、不均一吸収帯をもつ無機や有機物が対象となる。PHB材料として室温で動作する材料が望まれる。

6.2 ホログラフィックメモリ

信号光と参照光の2つの光の干渉によるホログラフィーを用いて2次元または3次元情報を2次元一括記録して、参照光によって元の情報を再生する方式である。同一個所に複数個のホログラムを角度多重、波長多重、電界多重、位相コード多重、および球面参照光シフト多重などの方法で多重記録する手法がある。

ホログラフィックメモリの特徴として、一つは3次元記録方式による大容量化、もう一つは1ページ当たりのデータ量を一度に記録再生できるので、1ビットごとにデータを読み出す従来の光メモリに比べて高速なデータ再生ができることがあげられる。このため、原理上、1Tbits/cm³の記録容量と1Gbpsの高速転送が可能と言われる。追記型ではフォトポリマー(光重合)、書換え型ではフォトリフラクティブ結晶やフォトクロミック材料が用いられる。フォトポリマーの場合、光重合による収縮が課題である。近年Tbをドーブした化学量論組成のLiNbO₃単結晶が不揮発性2色性ホログラフィック記録⁽³⁶⁾が可能であることが示された。また、ディスク型のホログラフィックメモリ(追記型)の実現を目指した開発研究⁽³⁷⁾が行われている。ホログラフィックメモリの実用のためには、高感度で情報が不揮発で安定な材料開発がまず鍵となると思われる。

6.3 プローブアレイ方式

走査型プローブ顕微鏡(SPM: Scanning Probe Microscope)の針先を用いて微小な記録ビットを記録する方式は、最小記録ビット長の大きさから、Terabits/in² - Petabits/in²の超高密度化の可能性が指摘されているが、高速記録再生方法を含むシステム面の課題は多い。

多数の開口アレイを作製し、並列にデータを記録再生することによって、高速記録を実現する試みがある。最近、米IBM⁽³⁸⁾は、“Millipede”と呼ぶ2.5インチ径で面記録密度0.8Tbits/in²(現在

のHDDの20倍)の実現を可能とするMEMS(Micro electro-mechanical system)プローブアレイ技術を開発し、その高速転送速度化などの記録再生を実証した。3mm角のプローブには、ナノメータ(nm)サイズの針先を持つ微小なカンチレバー(厚さ0.5 μm,長さ70 μm,先端針長さ2 μm)が32x32個、約1000個配列している。カンチレバー先端の熱(300 °C)でポリマー基板に40nmの穴(窪み)を形成して記録する。再生は新たに穴が開かない程度の熱をプローブの針を通して与えると穴の箇所では電気抵抗が変化するのでそれを針先のセンサーで検出するROM方式である。

6.4 並列光源による高速・高密度化⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾

日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業による近接場光プローブ技術と面発光垂直共振器半導体レーザー(VCSEL:Vertical Cavity Surface Emitting Laser)を用いて100Gbits/in²の面記録密度と100Mbpsの転送速度の達成を目標とするプロジェクトがある。これは、面発光レーザーの2次元アレイを光ヘッドに使用する方式で東海大学を中心に行われている。超小型面発光型VCSELアレイのレーザー(10000個アレイ/mm²)を用い、かつディスク回転の接戦方向にこの2次元アレイを少し傾斜させて配置させることにより、多数のレーザー光源による同時記録と同時再生を行う。10-60Gbpsの高速転送が原理上可能とされる。

7. 各種記録方式の新しい応用展開

7.1 DVD(デジタル多用途ディスク)

録画再生ができるDVDレコーダ(DVDビデオ記録フォーマットによる書き換え型映像記録装置DVR-1000)が1999年末、パイオニアから製品化された。このDVD-RW(記録容量4.7GB/片面)方式は、VTR、カムコーダーなどのユーザを対象にして、リアルタイム記録、編集性/操作性、高画質、ディスク空き領域の有効活用を目指して開発された。同様な製品としてDVD-RAMレコーダも製品化されている。デジタルVTRと異なり再生側と記録側の2台の機器を必要とせず、1台の機器でノンリニア編集が容易にできる。さらに、DVDフォーラムで、再

生専用ディスクに用いられたDVD-Videoフォーマットの記録ディスクへの応用が承認され、これに基づいたDVR-2000が登場した。これによって、ビデオモードでのDVD-RディスクとDVD-RWディスクへの録画が実現される。以降、後継機としてCD系メディア再生や画質向上などの機能を付加したDVR-7000が市販された。

7.2 HDD

放送中の番組を収録しながら、見たい番組を再生するという、ホームサーバーの機能を実現するには、50Mbps以上のデータ転送速度が必要とされる。大量の映像情報を収録しながら再生する動作をリアルタイムで処理するには、大容量性と高速なランダムアクセスが必要になる。このような背景から、HDDが映像用途として注目されるようになった。BSデジタル放送の到来とともに、HDDを搭載したテレビ番組の録画機、セットトップ・ボックス(STB)の製品化も発表された。STBと切り離された単体の製品としてHDDを用いたデジタル録画機(HDD内蔵型DVDレコーダ)も市販された。30GBの容量のHDDを用いて、タイムシフト視聴、録画中でも再生し始める機能、EPG(電子番組案内)などHDDの使い勝手の良さを生かした機能も実現している。HDDにDVDやデジタルVTRを組み合わせた複合型録画装置も開発されている。

7.2.1 HDDのカーナビ応用

1990年にGPSカーナビゲーションシステムが市販され、当初、地図の記録媒体はCD-ROMであった。以後、地図情報や付加情報の増加に伴い、記録媒体も大容量化が図られ、1997年にはDVD-ROMを搭載したカーナビゲーションシステムが商品化された。その後、2001年にはカーナビゲーションの地図情報メディアに10GB容量のHDDを採用して、HDDのもつ大容量、高速処理、書き込みが可能という特長を生かした機能を持つカーナビゲーションがパイオニアによって実現した。今後、より大容量のHDDの搭載により、ユーザの好みに迅速に対応する多機能化や通信手段との融合が期待される。

7.2.2 ビデオ配信 / ビデオホームサーバ

インターネットのスピードが速まれば、MP3の

ような音楽配信と同様な現象が将来、ビデオ分野においても起こると考えられる。マザーファイルの記録メディアは、光ディスクや磁気テープへとより高画質で即応性の高いものに置き換わってきている。しかし、依然としてギャザリングなどの編集作業が必要であった。近年、HDDの大容量化によって映像を長時間記録することが可能になり、それを用いたRAID(Redundant Array of Independent Disks)の信頼性も向上している。家庭内の一個所にRAIDベースのデータストレージサーバを用意しておけば、AV情報を複数のチャンネルで同時に使用出来、サーバで集中的に管理することが可能である。しかし、ビデオ情報量が巨大化すればするほど、その情報破壊への危険防止策が課題になる。それで、長期間にわたって保存するために、信頼性とランダムアクセス性に優れた大容量の光ディスクやそのチェンジャーを用いた高速なサーバ(STB)が今後大いに期待される。

7.3 小型携帯機器

小型携帯機器用のメモリとして、稼動部のない半導体メモリ(フラッシュメモリなど)に対して、大容量で小型なディスク型メモリとして、磁気記録、光磁気(MO)記録および相変化光記録などがある。

表1は、典型的なディスク型記録装置の仕様を現行のDVD(CDサイズ)とともに示す。1インチ径HDD「マイクロドライブ」(容量340MB、1GB)⁽⁴¹⁾が、デジタルスチルカメラやMPEGをベースとした

デジタルビデオへの応用が展開されている。650MB(64mm径)大容量化、9Mbpsの転送レートを持つミニディスク(MD)が開発⁽⁴²⁾され、カメラ一体型光レコーダへ応用されている。

松下電器とキャノンが共同開発した2インチディスクサイズ片面で3GB(面記録密度14.93Gbits/in²)のMOディスクは、DWDD法による再生方式を特徴とし、データ転送速度は24Mbps、トラッキング方式はサンプルサーボでディスク回転数は最大2000rpmである。iD-PHOTO⁽⁴³⁾の大容量次世代装置として位置づけられる。フィリップス⁽⁴³⁾は、直径30mmの小径ディスクに片面単層で1GB容量の光ディスク装置(青紫色レーザー光源、NA0.85)を開発している。PDA(携帯情報機器)への搭載を想定している模様である。1.1mm厚の基板に0.1mm厚のカバー層が用いられている。

これらの携帯機器は、低速、ケーブルなしでデジタル機器間のデータ変換を安価で簡単にこなうことができる次世代インターフェース(Bluetooth)を利用することによって、モバイル機器からパソコン(PC)へ、またはPCを介してヘッドフォンステレオなどの多くの組み合わせが想定しうる。一方、可動部のない半導体(フラッシュ)メモリ以外の新規不揮発性固体メモリ[強誘電体ランダムアクセスメモリ(FeRAM)、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)]の研究開発も進んでいる。

表1 代表的な小型情報記録装置の仕様

記録方式	相変化記録		光磁気記録		
	DVD	SFFO drive (Philips)	New-GIGAMO	iD-PHOTO	DWDD型(松下電器&キャノン)
媒体の種類					
面記録密度(Gbits/in ²)	3.27	12.56	4.19	4.58	14.93
記録容量(GB)	4.7	1	2.3	0.73	3
1ビット当たりの記録長(μm)	0.267	0.12	0.23	0.235	0.08
トラックピッチ(μm)	0.74	0.35	0.67	0.6	0.54
ディスク直径(mm)	120	30	88.9	50.8	50.8
光源波長(nm)	660	405	650	650	660
対物レンズのNA	0.6	0.85	0.55	0.6	0.6

8. まとめ

[1]従来から 磁気記録では超常磁性限界,光記録では光の回折限界を克服する技術が提案され, HDD, 光および光磁気ディスク装置の高密度化が図られてきた。

[2]HDDでは,超常磁性による熱揺らぎ耐性を高めるために記録媒体を多層化して,反強磁性結合を導入し,磁気ヘッドには高感度なGMR型再生ヘッドを採用することによって,実験室レベルで100Gbits/in²を超える面記録密度に達した。応用面では, HDD搭載のDVDレコーダやHDD搭載のカーナビゲーションなどのように異なる種類の記録方式の融合化/階層化も一層進むと思われる。

[3]可換性があり,ランダムアクセス性を備えた大容量の光ディスク装置が,今後ネットワークブロードバンド化の社会において,大きな役割を演じると思われる。ハイビジョン映像をDサイズに2時間以上記録するために必要な25GB以上の容量を備えた大容量書換え型次世代光ディスク装置が開発されている。

[4]電子ビーム露光によるnm加工を実現させる高精度なマスタリング技術は,片面1層で25GB以上,2層で50GB以上の記録容量を持つ光ディスクを開発するのに鍵となる技術である。この技術によって,200GB以上の高密度光記録達成の可能性が示された。

[5]ホログラフィックメモリや近接場光記録など光の回折限界を受けない記録方式やマルチプローブヘッドによる記録方式などの今後の進展が期待される。

9. 謝辞

磁気記録技術の研究動向の調査に有益な資料を提供して頂いた東京工業大学工学部中川茂樹助教授に感謝します。光ディスク装置の高密度マスタリング技術に関して有益な資料を提供して頂いた総合研究所ディスク開発グループの飯田哲哉氏に感謝します。日頃有益なご教示を頂く総合研究所菊池悟之氏に感謝します。

参考文献

- (1)日経エレクトロニクス・ブック「超高密度外部記憶装置の新展開」日経BP社,1998年
- (2)中川茂樹,工業材料,2001年12月号,p42
- (3)M.Yamagishi et al.,Intermag Europe 2002, Digest BA-01
- (4)榎間博,他:日本応用磁気学会誌22(1998)p1189
- (5)M.E.Re et al.,Intermag.Europe 2002, Digest BA-04,日経エレクトロニクス,2002.5.7,p26
- (6)(株)日立製作所 News Release 2002.5.7
- (7)佐藤勇武,他:日本応用磁気学会講演概要集,2000年,13p-PS12-14
- (8)日経エレクトロニクス 2002.7.1 p194
- (9)光テクノロジーロードマップ報告書-情報記録分野-1998年3月(財)光産業技術振興協会
- (10)大津元一,精密工学会誌 66(2000) p661,
- (11)E.Betig et al.,Appl.Phys.Lett., 61(1992) p142
- (12)S.Hosaka,et al.,Jpn.J.Appl.Phys.35(1996),p443
- (13)K.Kishima,et al.,Optical Data Storage Topical Meeting(ODS) 2001,p280
- (14)J.Tominaga et al.,Appl.Phys.Lett., 73 (1998)p2078,
- (15)藤寛,富永淳二,plus E, 22(2000) p202
- (16)T.Kikukawa et al.,Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS2002), Technical Digest, TuP.27
- (17)M.Katsumura et al.,Magneto-optical Recording International Symposium (MORIS)2002 Digest, We-N3 (p207)
- (18)T.Higuchi et al.,Optical Data Storage(ODS) Topical Meeting(ODS)2001, Technical Digest,p31
- (19)T.Kato et al.,Jpn.J.Appl.Phys., 41 (2002), p1664
- (20)T.Iida et al., ODS2001, Technical Digest.p253
- (21)M.Katsumura et al.,Jpn.J.Appl.Phys.,41 (2002)p1698
- (22)N.Shida et al., ISOM/ODS2002, Technical Digest,MC.2,
- (23)A.Mijiritskii et al.,Jpn.J.Appl.Phys., 41 (2002) p1668
- (24)金子正彦,日本応用磁気学会誌23(1999)p1999
- (25)T.Sakamoto et al., ODS Topical Meeting 2001, Technical Digest,p73
- (26)第3回次世代光メモリシンポジウム2001年,11/2

- (27)粟野博之 日本応用磁気学会誌 26(2002)p884 ,
- (28)M.Tani et al, ODS Topical Meeting
2001,Technical Digest ,p61
- (29)白鳥力 日本応用磁気学会誌 23(1999)p764
- (30)坂本ら 日本応用磁気学会誌25(2001)p1261
- (31)Y.Hino et al. , ISOM/ODS2002,Technical Di-
gest MC.4(p42) ,
- (32)伊藤章義 日本応用磁気学会誌 26(2002)p58
- (33)T.W.Mcdaniel et al. MORIS2002,Technical
Digest ,Tu-F1
- (34)川田善正,オプトロニクス,2001年11月号.p138 ,
- (35)平尾一之 他 ,レーザ研究2002年5月号 p233
- (36)畑野秀樹&北村健二レーザ研究 30(2002)p171 ,
- (37)H.Horimai et al , ISOMODS2002 , Technical
Digest , TuP.26 ,
- (38) IBM forum 2002 , 2/27-3/1
- (39) K.Goto et al. ISOMODS2002 , Digest ,WC.5 , p293
- (40)小山二三夫他 , 応用物理 68(1999)p1380
- (41)青柳充彦 & 黒木賢二 日本応用磁気学会誌 24
(2000) p 19
- (42)G.Fujita et al. Jpn.J.Appl.Phys. ,41(2002)p1643
- (43)M.A.H. van der Aa et al. , ISOMODS2002,Technical
Digest , WA.1(p251)

筆 者

伊 藤 寛 (いとう ひろし)

- a.研究開発本部総合研究所
- b.1978年
- c.リボンセンダスト薄帯ノヘッドの研究開発後金
属超微粒子の製造に関する研究磁気および光磁
気記録媒体の研究 電子放出素子の研究を経て ,
現在に至る。理学博士