

次世代光メモリの展開

物理システム工学科 佐藤勝昭*

1. はじめに

世界的な情報技術革命の流れは、有線・無線のネットワークを中心に急速に進展しているが、情報技術を下から支えるハードディスク、光ディスクなどの補助記憶装置の発展も忘れてはならない。1990年代半ばまで、年率30%の割合で推移してきた磁気ディスクの密度の増加は、MRヘッ드의導入とともに年率80%という驚異的な伸びを示すようになった。Mooreの法則によればCPUの能力は年率60%で伸び続けているので、ハードディスクの伸びは、CPUを上回ったのである。ハードディスクの面記録密度は、現行のもので20Mb/in²程度に達しており、チャンピオンデータは、面内記録で36Gb/in²、垂直記録では55Gb/in²に及んでいる。一方、リムーバブルなメディアとしての光ディスクの記録密度は10Gbit/in²程度であり、1990年代半ばまではハードディスクを上回っていたが、今では、逆転されてしまった。にもかかわらず光ディスクを中心とする光メモリは、今後とも生き残ると考えられている。ハードディスクの容量増とともに、ソフトのインストール、データのバックアップ、データの長期保存、データの配布などのためのメディアとしての光ディスクの需要が高まると予想されるからである。

相変化記録をベースとする書き換え型DVD(DVD-RAM, DVD-RW)の登場とデータ圧縮技術の進歩は、動画の長時間デジタル記録を可能にし、家庭用ビデオテープに取って代わろうとしている。青紫色半導体レーザの開発により、高密度化はいつその進展を見せようとしている。また、これまで不可能と思われていた超解像技術の導入もSuper-RENSの登場で可能になりつつある。

DVDのみならず光磁気記録(MO)技術の進展も見逃せない。実際、MO技術をベースとするMDはオーディオカセットを駆逐する勢いで伸びている。MOの基本は磁気記録であるから、その潜在能力は相変化光記録に比べ格段に大きい。磁気超解像(MSR)技術、磁区拡大再生(MAMMOS)技術、青紫色レーザにより、ハードディスクを超える高記録密度を達成できる見通しができてきた。さらには、半球レンズを用いた近接場MO記録とMRヘッド再生を組み合わせたハイブリッドハードディスクも提案されている。

もっと長期的に見たとき、果たして光ディスクという形態で将来の高密度・高転送レート化に対応できるであろうか。次世代のメモリとして、ホールバーニング記録、ホログラフィックメモリなど、回転機構を必要としない光メモリの研究も進められている。この小文では、光メモリの基礎、現状と将来展望について概説する。

2. 光ディスクの基礎

2.1 光ディスクの分類

光ディスクとは、レーザ光を用いてデータを再生するディスクで、再生専用型(CD-ROM, DVD-ROM など)、追記型(CD-R, DVD-R など)、書き換え可能型(CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW, MO, MD)に分類される。

まず、CD-ROMでおなじみの再生専用ディスクであるが、デジタル情報(0,1)はピット(くぼみ)として記録されている。ピットは、型を作ってプレスするか、型にプラスチックを流し込んで固める方法(射出成形)によって作られる。ピットの直径は光をレンズで絞ったときに回折限界で決まるウェストのサイズより小さく深さは

$\lambda/2n$ となっている。(nは基板の屈折率で、基板面から光が入るので波長は基板の屈折率分の1になっている。)ピットの底からの反射と周りからの反射が干渉しうち消し合い、ピットのある部分の反射率は低くなっている。再生専用ディスクはこのような仕組みなので、後述の書き換え可能型よりもピット径が小さく、高密度に記録されている。

追記型というのは、消去や書き換えはできないが記録が可能なディスクで、write-once(一度だけ書ける)とも呼ばれたが、場所を変えて追加して記録できるという意味で追記型と呼ばれることが多い。追記型として、実際に無機・有機材料に穴をあけるもの、相変化を利用するもの、相互拡散によるもの、色素の分解による熱変形を利用するものが提案されたが、現在では、色素を用いた熱変形タイプのものがCD-R, DVD-Rという形で定着した。プラスチック(polycarbonate)基板に色素層を塗布し、その上に金の反射層を蒸着した単純な構造なので、低価格に製造できる点の特徴である。色素の吸収帯の波長をもつレーザビームが照射されると、色素が光を吸収し熱エネルギーに変わり色素が分解し気体が発生、その圧力で、熱的に軟化した基板に変形が生じることが記録の原理である。再生の時には、基板変形によって戻り光の位相が周辺より進むことで、CD-ROMと同様の位相差によるピットが形成される。

書き換え可能型には、結晶-アモルファスの構造相変化を利用した相変化光ディスク(CD-RW, DVD-RAM, DVD-RW)と、熱磁気記録と磁気光学再生を利用した光磁気ディスクとがある。2.2と2.3では、これらの書き換え型光ディスクについて原理を紹介する。

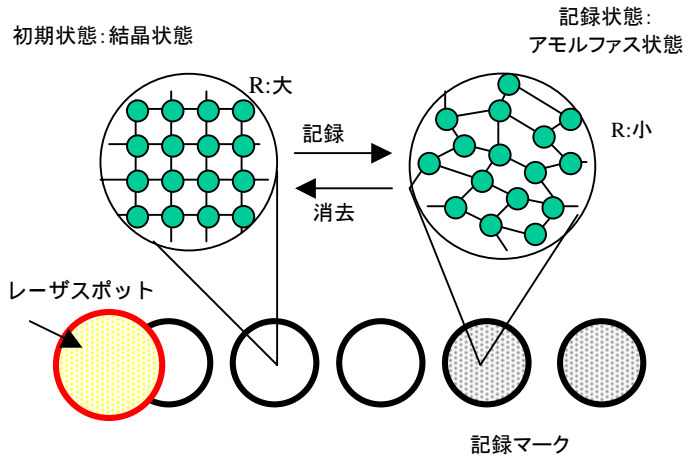
現行光ディスクの分類

	再生専用型	追記型	書き換え可能型
孔あけ型	CD-ROM, DVD-ROM		
熱変形型		CD-R, DVD-R	
相変化記録			CD-RW, DVD-RW, DVD-RAM
光磁気記録			MO, MD, iD-photo

* E-mail: satokats@cc.tuat.ac.jp; Home page: <http://www.tuat.ac.jp/~katsuaki/>

2.2 相変化光ディスク^{1,2}

一般に物質を融点 T_m 以上に加熱して急冷するとアモルファス（非晶質）固体となるが、このアモルファス相の固体を結晶化温度 T_{Cr} 以上に熱し徐冷すると結晶化が起きる。GeSbTe などの多元化合物においては、融点(600℃程度)、ガラス転移点(400℃)が比較的低いので、レーザの強度を変えることによってアモルファス相と結晶相を容易に制御できる。再生にはレーザの反射光強度がアモルファスでは低いが結晶では高いという性質を利用する。直接重ね書きが容易であること、MO と異なり偏光を使わず光の反射強度しか利用していないので、光ヘッド構造が単純で、かつ、再生専用ディスクとの両立性があるという利点をもつ。一方、欠点は、信号強度は確かに強いがノイズが多い、消え残りをなくすることが困難である、書き換え可能回数に制限があることなどである。消え残りに関しては、レーザパワーのマージンがあれば対応が可能である。一方、書き換え可能回数については、非晶質化の際に融点(~600)を超える高温になるため、保護層が変形し融解した記録膜が記録トラック方向に押し出され、アモルファス領域が減少していくことによる。



DVD ファミリーの仕様

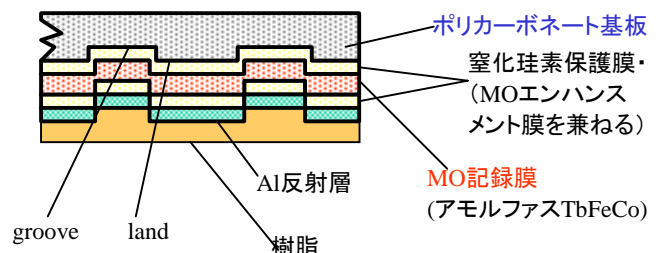
	DVD-ROM	DVD-R	DVD-RAM	DVD-RW	DVD+RW
容量	4.7 / 9.4	3.95 / 7.9	2.6 / 5.2	4.7	3.0
形状	disk	disk	cartridge	disk	disk
マーク形成材料	ピット形成	熱変形型有機色素	相変化型 GeSbTe 系	相変化型 AgInSbTe 系	相変化型 AgInSbTe 系
レーザ波長	650/635	650/635	650	638/650	650
レンズNA	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65
マーク長	0.27	0.293	0.41-0.43	0.267	
トラック幅	0.74	0.8	0.74 L/G	0.74 G	0.74 G
書き換え可能回数	-	-	10^5	10^3 - 10^4	10^3 - 10^4

媒体は、基板上に金属反射層、誘電体層、相変化記録層、誘電体層という積層構造になっている。相変化層の材料としては、DVD-RAM では Ge-Sb-Te 系(GeTe+Sb₂Te₃+Sb)が、CD-RW, DVD-RW では Ag-In-Sb-Te 系が使われる。GeTe は結晶化時間が 30ns と速いが体積収縮率が高いためクラックを生じやすい。一方、Sb₂Te₃ の結晶化時間は数 μs と遅いが、クラックを生じにくいので、両者を混合して結晶化速度の最適な組成比を選ぶ。書き換え可能回数は 10 万回と言われている。結晶とアモルファスの反射率差は、屈折率 n、消光係数 k の違いから干渉効果の変化が生じることに起因している。DVD-RAM では、結晶相で 50%、アモルファス相で 30%位なので、ドライブに工夫をしない限り DVD-ROM との両立性はない。一方、Ag-In-Sb-Te 系は、消去状態を単一の結晶相とせず、AgSbTe₂ 微結晶相とアモルファス In-Sb の混相とすることにより熔融消去を容易にしている。DVD-RW では、結晶相とアモルファス相の位相差を大きくとることにより、コントラスト比を大きくしている。このため DVD-ROM との互換性が保証されている。ただし、この材料の場合、書き換え可能回数は 2000 回程度であると言われる。次世代の高密度相変化記録ディスクとして提案されている DVR では、Sb₆₉Te₃₁ をベースとする成長速度の速いメディアが用いられる。

2.3 光磁気ディスク

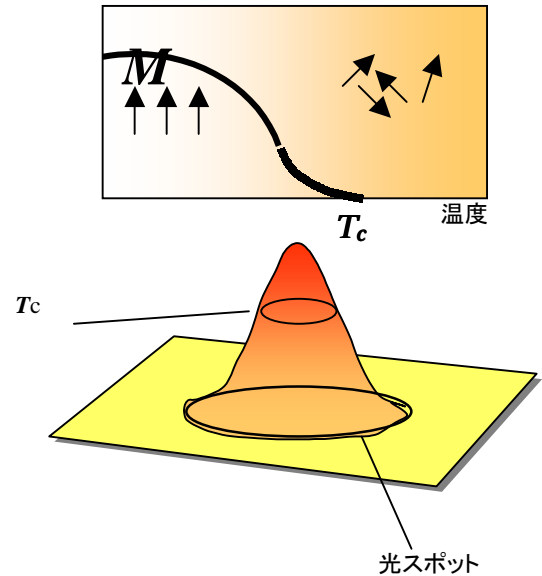
光磁気(MO)記録は、光を用いた磁気記録である。情報は微小な磁区として書き込まれる。MO 媒体の構造は、プラスチック基板に誘電体(SiN など)をスパッタ法で堆積し、その上に光磁気記録膜(TbFeCo など)をスパッタし、さらに誘電体を堆積し、その上に金属反射膜(Al など)を堆積した 4 層膜を用いている。直接重ね書き(direct overwrite)ができる仕様の媒体の場合は、磁性体層が複雑な構造をしている。誘電体層はアモルファス膜の保護膜としての意味と、磁気光学効果のエンハンスのための光学薄膜をかかっている。

記録のメカニズムの詳細は専門書に譲り、ここではその概略のみを紹介する。磁気記録媒体としてはアモルファス TbFeCo をベースとする保磁力の大きな垂直磁化膜が使われる。この膜は予めある方向に 10kOe 程度の強い磁界で磁化しており、記録したい部分のみを加熱された部分が室温に戻るとき、まわりの部分からの逆向きの磁界を受けて磁化反転を起こしてマークが記録される。この際に永久磁石やコイルで磁界を印加して磁化反転を助けてやると磁化反転が完全に行われる。これが光磁気記録の原理である。この記録方式は熱磁気記録、あるいは、キュリー温度記録と呼ばれる。相変化記録との違いは、物質の構造を変えるのではなく磁化を変化させるだけな



のでキュリー温度 T_c (~ 300) 以上に加熱すればよく、はるかに低い温度上昇で十分である。構造変化を伴わないので、書き換え可能回数は 1000 万回以上とされている。レーザー光を照射したスポットのうち T_c 以上に加熱された部分のみ磁化が失われる。記録の方法としては、光強度を変調する LIM 方式と、磁界を変調する MFM 方式とがある。現行の MO ディスクは LIM 方式である。MFM 方式の方が線記録密度を高くできるが、記録用磁気ヘッドが必要である。

光磁気記録された記録マークを磁気光学効果により再生する方法について述べる。半導体レーザーの光を偏光子を通して直線偏光とし、レンズにより光磁気膜に焦点を結ばせ、反射されて戻ってきた光の偏光が、記録された磁区の磁化に応じた磁気光学効果を受けて回転することを利用して電気信号に変えて再生する。記録膜による偏光の回転角はせいぜい 0.5 度なので誘電体膜/MO 記録膜/誘電体膜/反射膜という構成にすることでエンハンスしている。 ± 0.5 度という小さな回転を電気信号に変えるために偏光ビームスプリッターで p s 両偏光に分け、それぞれを検出して差をとる差動方式がとられる。磁気光学効果の原理、および、種々の物質における回転角や、そのスペクトルなどは、参考書に譲る。



3. 光ディスクの高密度化

一般に光をレンズで絞ったときに、回折限界で決まるスポットの大きさは $d=0.5 \lambda/NA$ となる。ここに NA はレンズの開口数である。NA ~ 0.6 なので、 d は波長程度である。従来の赤色レーザーの場合読み出せる最小のマークサイズは 600nm 程度ということになる。従って、スポット径を小さくして高密度化を図るには、NA を大きくするか波長を短くすればよい。NA を 0.85 程度にし、青紫色レーザーを用いることができれば、スポット径は半分、従って、トラックピッチを半分にすれば 4 倍の高密度化が実現する。さらに、超解像技術、近接場技術の適用によってさらなる高密度化が見込まれている。

ASMO Technologies

LD wavelength	650 nm
NA	0.6
Disk diameter	120 mm
Thickness	0.6 mm
Track pitch	0.6 μ m Land/Groove
Recording method	MO & CAD-MSR
Modulation	Laser pumped MFM
Signal processing	PRML (bit density 0.235 μ m) PR(1,1) or PR(1,2,1)
Velocity control	ZCAV/ZCLV
Code	NRZI+ (DC suppressed)

DVD-ROM についてはマスタリングの高密度化、青紫色レーザーの採用により 12cm ディスクで 25GB の大容量が可能であることが示されている³。また、次世代 DVD-RW についても、高 NA レンズと青紫色レーザーにより、22GB の大容量化に見通しがついた⁴。また、Super-RENS という超解像近接場技術が開発され、100nm マークを再生できることが示された⁵。

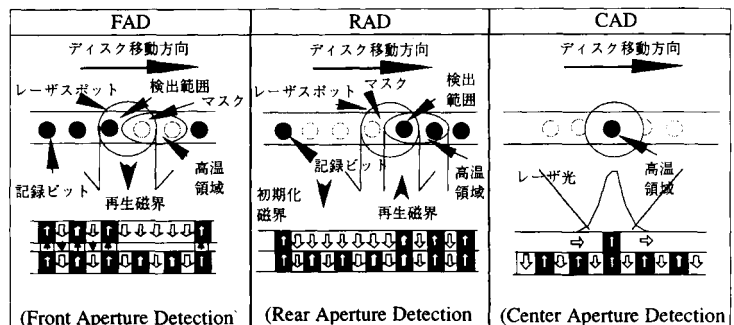
一方、MO ディスクについては、現行の赤のレーザーでも磁気超解像(MSR)技術を用いた GIGAMO(3.5"ディスク 1.3GB)が市販されており⁶、表の ASMO 規格では 4.6 Gbit/in² の高密度が設定されている⁷。この技術によるデジタルスチルカメラ用 MO ディスク iD-Photo が本年市販されるがこれまでで最も小さい直径 5cm のディスクに 730MB の大容量記録が可能である⁸。さらに青紫色レーザーと高 NA レンズによって 20Gbit/in² を達成できることが示されたが、これは 12cm ディスクで 25GB の大容量に相当する⁹。また、磁区拡大再生技術(MAMMOS)により 64Gbit/in² の高密度が可能であることが示された¹⁰。以下に、高密度化の要素技術を解説する。

3.1 超解像

3.1.1 磁気超解像(MSR)と磁区拡大再生(MAMMOS)

磁気超解像(MSR)は、読み出しに用いるレーザーの波長よりも小さなピットを読み出すための技術である¹¹。このディスクは、交換結合した読み出し層/記録層から構成されている。これには、FAD (フロントアパーチャ検出)、RAD (リアアパーチャ検出)、CAD (センターアパーチャ検出) という 3 つの再生方式がある。FAD, RAD のポイントは、読み出しの際のレーザー光による高温部分が

一様ではなく一部に集中しており、回転に伴って、高温部がやや後方に偏ることを利用している。FAD では、読み出し層における記録マークの後ろの部分に転写されたマークをマスクすることにより小さなマークを読み出す。一方、RAD では読み出し層を予め磁界によって消去しておき、高温部で記録層から転写して読むのでクロストークに強いという特徴がある。CAD 方式は、これらとはやや異なっており、記録層の上に面内磁気異方性をもつ読み出し膜を重ね

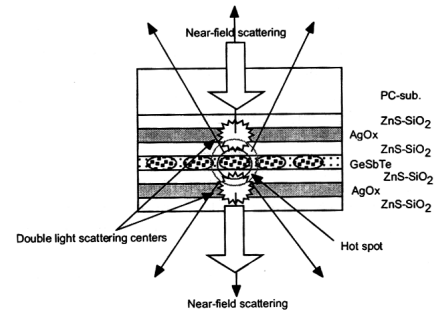


ておく。レーザー光で加熱すると中心部のみの異方性が変化し、交換結合により記録層から読み出し層に転写がおきる。転写された部分は光の波長よりかなり小さな領域であるから、回折限界以下の小さなビットを再生できるのである。この方法では、光が当たった部分以外は表面に垂直磁化が現れていないので、隣接するトラックからのクロストークに強いなどの特徴を持つ。1998年に市場に出た GIGAMO と呼ばれる 1.3GB の容量をもつ 3.5"MO ディスクは、MSR を利用したはじめての市販品である。この MSR は RAD の一種でレーザービームの前部と後部にマスクのできるダブルマスク RAD 方式とよばれるものを使っている。次世代の MO 規格である ASMO では、CAD が採用される。

MSR は記録磁区の 2-3 倍の直径のビームを使いながら、記録磁区以外の部分をマスクすることにより微小磁区を再生するが、ビームの利用効率が悪く信号強度が小さくなる。これを解決しようというのが磁区拡大再生である¹²。MSR により読み出し層に転写された磁区が外部磁界の存在のもとで拡大するので、ビームの直径程度まで大きくすることができる。次のマークを読むためには、逆方向の磁界をかけて読み出し層の転写磁区を壊す。このような磁区の拡大はかつてパブルメモリの研究において確立したものである。これを用いると、単なる MSR では信号が小さすぎて再生できない 0.1 μm 以下の記録マークも大きなマークの再生信号と同程度の振幅で再生できることが示された。これを MAMMOS (magnetically amplified MO system) と称している。このほか、一方の磁壁のみを動かして磁区拡大をはかり信号強度の増大を目指す DWDD (domain wall displacement detection) という磁区拡大再生も提案されている¹³。

3.1.2 Super-RENS(Super-resolution near-field structure)

相変化ディスクにおいてレーザーの回折限界以下のマークを再生する方法として Super-RENS という方式が考えられた。これは、記録媒体の上に Sb、AgOx などの膜を重ねておき、レーザー光照射誘起の吸収飽和による開口、または、AgOx の分解による光散乱を用いた近接場検出を利用する¹⁴。これにより、以前は不可能とされていた相変化光ディスクへの超解像技術の適用が可能であることが示された¹⁵。また、MO ディスクへの応用も提案されている¹⁶。

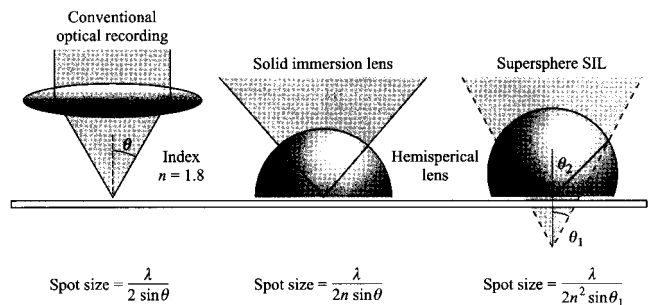


3.2 短波長化

ワイドギャップ III-V 族半導体 InGaN を用いた短波長レーザー(~405nm) が実用レベルの出力と寿命を達成し、これを用いた光記録の実験が行われている。電子ビームマスタリングで作製したトラックピッチ 0.26 μm、マーク長 0.213 μm の容量 25GB の DVD-ROM を高開口数(NA=0.85)のレンズを用いて再生することに成功した¹⁷。また、405nm を用いた相変化記録では直径 12cm のディスクに 22.4GB の容量、50Mbit/s のデータレートで記録再生するという成果を達成している。また、2層構造の DVD-RAM において、NA=0.65 のレンズでトラックピッチ 0.34 μm、マーク長 0.29 μm、層間距離 35 μm、容量 27GB ディスクの記録再生を行い、33Mbps の転送レートを達成した¹⁸。MO ディスクの場合は、現行のレーザー 635nm でも MSR-MAMMOS により 20GB/in² の高密度(3.5"で 10GB)記録の可能性が実証されているので、405nm の LD を用いると原理的には 120mm ディスクで 75-90GB の大容量が可能とされている¹⁹。伊藤らは青色レーザー(413nm)と、高 NA レンズ、および MAMMOS 技術を組み合わせ、200nm 周期に配列した 100nm 径のマークを高い CNR で読むことに成功した。これは 64Gbit/in² の記録密度に相当する¹⁰。

3.3 近接場

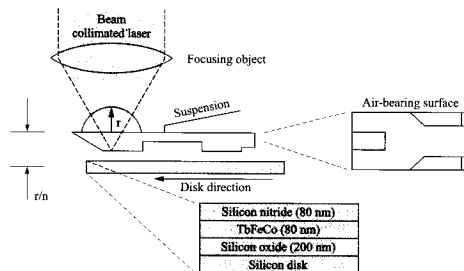
Betzig らは近接場を用いた光磁気記録に初めて成功した²⁰。彼らは光ファイバ・プローブを用いて Pt/Co 人工格子膜に直径 60nm のマークを波長 514nm の光で近接場記録し、記録磁区を近接場磁気光学顕微鏡で観測した。日立中研のグループはこの方法が光磁気記録だけでなく光相変化記録にも利用できることを明らかにした^{21,22}。しかし、このように光ファイバ・プローブを走査するやり方では、高速の転送レートを得ることができない。このことを解決する方法として提案されたのが、SIL (solid immersion lens) ²³ というレンズを用いた光磁気記録である²⁴。



SIL 光学系そのものは近接場ではなく通常の回折理論が成立する系である。はじめに述べたように回折限界はレンズの NA=n sinθ に反比例するのでこの NA を大きくしてやれば分解能が向上する。NA を大きくする方法として、開口角θを大きくするとともに、対物レンズと対象物体の間の空間を屈折率 n の大きな液体で満たす手法がある。その液体の代わりにレンズの媒質自体を使うのが SIL である。図は、SIL についての説明図である²⁵。レンズで集光された場合のスポットサイズはほぼ 0.5λ/NA で与えられ、通常のレンズの場合 NA は 0.5-0.6 程度なのでスポット径はλの程度であるが、半球型の SIL を用いると n=2、θ=45°として、NA=1.4 程度にすることができるのでスポットサイズは 0.18λとなつて、通常のレンズ系の 1/3 程度となる。さらに、スーパースフェア・レンズと呼ばれるレンズを用いると、スポットサイズは 0.5λ/n² sinθ₁ で表され、n=2、θ₁=45°として、0.09λの解像度が得られる。臨界角より大きな入射角でレンズの底面に達した光は全反射するので、SIL の平坦な底面からは伝播光として出射せずエバネセント波となる。従って、SIL と記録媒体の距離を近接場の範囲に保持するならば、近接場記録・再生が可能である。

図に示すように、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

アイデアが 1994 年 Terris らにより出された²⁶⁾。この方法により、面記録密度 380Mbit/cm²、データ転送速度 3.3Mbps を達成している。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 2Gmarks/in² を達成していると発表した²⁷⁾。この SIL 記録については、ヘッド浮上量は 100nm 以上あるため必ずしも近接場の範囲になくまた、臨界角より小さな入射角で入った光の効果が大きいので、近接場記録とすべきではないとの批判もある。



4. 光ディスクと磁気ディスクの融合

磁気ディスクの高密度化が進み磁区が極端に小さくなった結果、記録された磁区の磁気モーメントが熱揺らぎの効果で回転し緩和する現象が生じ、記録の安定性が損なわれるため、高密度化には限界があると考えられている。この限界を超える手段として光磁気記録技術と MR ヘッド再生技術を組み合わせた光アシスト磁気記録技術が提案された^{28), 29)}。日立中研のグループは、最近、記録層として TbFeCo、再生層として TbDyFeCo を組み合わせた 2 層膜を用い、青色レーザーと SIL を組み合わせた光学系を用いて記録し、190nm ギャップをもつ GMR ヘッドで再生することによって 300kFCI の線記録密度を達成している。MFM による観測では 100 nm 径の磁区形成が確認され 60 Gbit/in² の記録密度に相当することを報告した³⁰⁾。一方、シャープのグループは記録・再生いずれにもレーザーを援用することにより、0.3 μm 以下の狭いトラックピッチでも高いクロストーク除去比で GMR ヘッド再生が可能であることを報告した³¹⁾。

5. 革新技術をめざして

5.1 ホログラフィ

次世代光メモリとして最もよく研究されているのはホログラフィ記録技術である。ホログラフィは体積記録が可能なので、光ディスクのような 2 次元記録に比べ圧倒的な高密度記録が可能である。多重化の方法として、角度多重³²⁾、波長多重³³⁾、位相コード多重³⁴⁾などが提案されている。また、偏光多重も研究されている³⁵⁾。このような多くの基礎研究が行われてきたが、これまで実用的なメモリはできていない。その原因は、(1)手法が複雑、(2)よい媒体がない、(3)高価で複雑かつ不安定なレーザーが必要、(4)アレー型検出器の効率が悪く高価、(5)SLM の性能が悪い、などであった。しかし、最近になり、(1)媒体の単純な並進移動による多重化 + 位相相関多重化、(2)よい媒体(Fe 添加 LiNbO₃、および、光ポリマー)の開発、(3)低価格・高信頼性の高出力固体レーザーの市販、(4)CMOS 型アクティブピクセルデテクタ(APD)の出現、(5)デジタルマイクロミラー(DMD)の開発、など要素技術が進歩したおかげで、ようやく実用デバイスの見通しが出てきた³⁶⁾。ベル研では Fe 添加 LiNbO₃では 350 チャンネル/μm²、光ポリマーでは 48 チャンネル/μm² の記録に成功している³⁷⁾。200 Kbit/page、ビット誤り率 10⁻⁵ が得られている。

5.2 ホールバーニングメモリ

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、その波長位置の狭い波長範囲の吸収率が減少することを利用したメモリを光化学ホールバーニング(photochemical hole burning=PHB)メモリという³⁸⁾。PHB の起きるのは、不均一吸収帯をもつ無機または有機物質である。無機物においては、アルカリハライドの色中心(アニオン空孔)の電子励起とトラッピングによる吸収帯、酸化物やアルカリハライド中の希土類イオンや遷移金属イオンの電子励起による吸収帯が対象となっている。光永らは Eu⁺³: Y₂SiO₅ を用いてホールバーニングによるホログラフィック動画記録に成功している³⁹⁾。有機材料においては、光互変異性、水素結合の光最配位、光イオン化などによる光吸収帯が用いられる。ホールの幅は 0.02nm 程度、不均一幅は 40nm 程度である。富士通のグループは半導体量子ドットを用いた波長多重メモリを作製し、波長の異なる 2 つの書き込み光による複数のホールバーニングを、世界で初めて観測した。この素子は、ダイオードの中に結晶成長技術により量子ドットを埋め込んだ構造をしており、量子ドットの光吸収に対応する複数の波長での情報の書き込みを可能にするものである。量子ドット一つの吸収線幅、あるいは均一幅は、この状態密度の形状を反映し、0.1meV 以下であるが、量子ドットの集合体と見ると、サイズ揺らぎによる大きな不均一幅(100meV)を示すので、波長多重度は"不均一幅/均一幅"で表わされ 1000 程度が期待テラビット(Tbit, 10¹²)級メモリへの可能性がある⁴⁰⁾。ホールバーニングは、現在のところ低温でなければ発現しない。実用のためには、室温動作する物質の探索が望まれる。

6. おわりに

光メモリの現状と今後の展開について概説した。なるべく、最新の動向を紹介するように努力したが、不勉強のために紹介し忘れた話題、紙数の関係で割愛した話題も少なくない。この小文が光メモリに関心をお持ちの若手研究者の何らかの参考になれば幸いである。

参考文献

- ¹ 寺尾元康、太田憲雄、堀籠信吉、尾島正啓：光メモリの基礎 p.70
- ² 寺尾元康：応用物理 68 (1998) 1144
- ³ T. Imai, N. Shida, K. Suga, T. Higuchi, T. Iida and F. Yokogawa: *Digest ISOM2000, Sept 5-8, 2000, Chitose*, p. 20.
- ⁴ H.J. Borg, M. van Schijndel, M.H.R. Lankhorst, G.F. Zhou, B.A.J. Jacobs and M.J. Decker: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 6.

- ⁵ J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano and N. Atoda: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) 957.
- ⁶ K. Shono: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, Suppl.S1 (1999) 177
- ⁷ S. Sumi, A. Takahashi and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn.* **23**, Suppl. S1 (1999) 173
- ⁸ S. Ohnuki, M. Yoshihiro, K. Shimazaki and N. Isoe: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30-Nov. 2, 2000, Nagoya*, p.108.
- ⁹ T. Miki, A. Nakaoki and M. Yamamoto: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30-Nov. 2, Nagoya*, p. 110.
- ¹⁰ 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.
- ¹¹ K.Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko and K. Watanabe: *Proc. SPIE* **1499**, (1991) 209
- ¹² H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, N. Ohta, A. Yamaguchi, S. Sumi and K. Torazawa: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 4257
- ¹³ T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka and Y. Hozumi: *J. Magn. Soc. Jpn.* **22**, Suppl. S2, 47 (1998)
- ¹⁴ J. Tominaga, *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 198.
- ¹⁵ H. Fuji, J. Tominaga, H. Katayama and N. Atoda: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 174.
- ¹⁶ J.H. Kim, Y. Yamakawa, H. Fuji, T. Nakano, D. Buechel, J. Tominaga, and N. Atoda: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 204.
- ¹⁷ M. Katsumura, H. Kitahara, M. Ogasawara, Y. Kojima, Y. Wada, T. Iida and F. Yokogawa: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 18.
- ¹⁸ T. Akiyama, M. Uno, H. Kitaura, K. Narumi, K. Nishiuchi and N. Yamada: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 116.
- ¹⁹ K. Ogawa, S. Moroto, K. Itoh, K. Shono and S. Ogawa: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 70.
- ²⁰ E. Bezig, J.K. Trautman, T.D. Harris, J.S. Weiner and R.L. Kostelak: *Science* **251**, 1468 (1991).
- ²¹ R. Imura, T. Shintani, K. Nakamura and S. Hosaka: *Proc. 3rd International Symposium on Physics of Magnetic Materials*, 1995, Seoul, Korea p.511
- ²² S. Hosaka, T. Shintani, M. Miyamoto, A. Hirotsume, M. Terao, M. Yoshida, K. Fujita and S. Kammer: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) 443.
- ²³ S.M. Mansfield and G. Kino: *Appl. Phys. Lett.* **57** (1990) 2615.
- ²⁴ B.D. Terris, H.J. Mamin and D. Rugar: *Appl. Phys. Lett.* **68** (1996) 141.
- ²⁵ P.F. Carcia and T. Suzuki: *Magneto-Optical Recording Materials*, Eds. R.J. Gambino and T. Suzuki, *IEEE, New York, 2000*, Chap. 3, p.90
- ²⁶ B.D.Terris, H.J. Mamin, D. Rugar, W.R. Studdenmund and G.S.Kino: *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994) 388.
- ²⁷ P. Glijer, T. Suzuki, and B. Terris: *J. Magn. Soc. Jpn.* **20** Suppl.S1 (1996) 297.
- ²⁸ H. Nemoto, H. Saga, H. Sueda and M. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.* **23** Suppl. S1, 229 (1999)
- ²⁹ H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima and K. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.* **23** Suppl. S1 (1999) 233
- ³⁰ H. Saga, H. Nemoto, Y. Itou, C. Haginoya and H. Sueda: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30-Nov. 2, 2000, Nagoya*, p.92.
- ³¹ M. hamamoto, K. Kojima, J. Sato, K. Watanabe and H. Katayama: *Digest MORIS/APDSC2000, Oct. 30-Nov. 2, 2000, Nagoya*, p112.
- ³² D.L. Staebler, J.J. Amodei, and W. Philips: *Digest 7th Int. Quantum Electron. Conf. (Joint Council Quantum Electronics, Montreal, 1972)* p.611.
- ³³ G.A. Rakuljic, V. Levya and A. Yariv: *Opt. Lett.* **17** (1992) 1471.
- ³⁴ C. Denz, G. Pauliat and G. Roosen: *Opt. Commun.* **85** (1991) 171.
- ³⁵ K. Kawano, T. Ishii, J. Minabe, T. Niitsu, Y. Nishikata and K. Baba: *Opt. Lett.* **24** (1999) 1269.
- ³⁶ W.L. Wilson, K. Curtis, M. Tackitt, A. Hill, T. Richardson, L. Dhar and A. Harris: *Digest ISOM2000, Sept. 5-9, 2000, Chitose*, p. 194.
- ³⁷ L. Dhar, C. Boyd, S. Campbell, K. Curtis, A. Harris, A. Hill, N. Levinos, M. Schilling, M.C. Tackitt and W.L. Wilson: *OSA Technical Digest Series*, (1998) p.113.
- ³⁸ 寺尾元康、太田憲雄、堀籠信吉、尾島正啓：光メモリの基礎 p. 104
- ³⁹ 光永正治，上杉 直，佐々木 浩子，唐木 幸一：応用物理，**64** (1995) 250.
- ⁴⁰ <http://www.fujitsu.co.jp/hypertext/news/1998/Dec/7.html> 1998/12/07