

## 磁気光学の基礎 IV

### 4. 磁気光学効果の応用 I

#### Elementary Course on Magneto-Optics IV

##### 4. Application of Magneto-Optical Effect I

佐藤勝昭 東京農工大学工学部

K. Sato, Tokyo University of Agriculture and Technology

#### 4.1 はじめに

第1回から第3回まで、磁気光学効果の基礎となる事項について述べてきた。今回からは、磁気光学効果の応用および今後の展開について記述する。磁気光学効果の応用としては、光磁気記録、光アイソレータで、磁界センサなどがある。今回は、光磁気記録を中心に記述する。

#### 4.2 光磁気記録の歴史<sup>4.1), 4.2)</sup>

光磁気記録は、60年代後期から大容量高密度の記録方式として注目され MnBi を媒体材料として熱心な研究が行われてきた。しかし、本格的な研究が始まったのは、アモルファス磁性体へのキュリー点記録が検証された70年代半ばになってからであった。その後、日本での地道な研究が実を結び、1988年以来光磁気(MO)ディスクとして市販され、日本においては、書き換え型光ディスクのうち最もポピュラーなメディアとして普及した。記録容量も、第1世代の5インチ(両面)650MB、3.5インチ(片面)128MBから、第2世代(230MB)、第3世代(640MB)を経て、さらに第4世代の1.3GBまで着実に増加している。この間、光強度変調型直接重ね書き(LIMDOW)<sup>4.3)</sup>、磁気誘起超解像(MSR)<sup>4.4)</sup>など、磁性物理に基づくさまざまな工夫と発明がなされ、それらが直ちに実用化され製品として市場に送り出されてきた。さらに1997年には次世代のMOとして5インチ6GBのAS-MO規格が発表され<sup>4.5)</sup>、さらにMAMMOS(Magnetic Amplification Magneto-Optical System)、DWDD(Domain Wall Displacement Detection)の新しい高出力再生技術が開発され、記録密度は伸び続けている。一方、1994年にはオーディオ用のミニディスク(MD)が開発され、今日ではカセットテープを駆逐する勢いで伸びている。このように光磁気記録は大きな発展を見せたが、意外にも原理や実際について一般にあまり知られていない。以下では技術的な詳細は最小限にとどめ、光磁気記録の原理に重点を置いて紹介するとともに、さまざまな磁性物理の利用によりどのように記録密度の向上が図られてきたかについても紹介したい。

#### 4.3 光磁気ディスクの原理<sup>4.1)</sup>

##### 4.3.1 キュリー温度記録の原理

Fig. 4.1に、光磁気ディスクの記録の原理図を示す。記録のメカニズムの詳細は4.5に述べるので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保磁力の大きな垂直磁化膜が使われる。この膜はあらかじめある方向(図では下向き)に10 kOe ( $\approx 800$  A/m)程度の強い磁界で磁化してあり、記録したい部分のみをレーザー光で局所的に加熱しキュリー温度( $T_c$ )以上にするとともに、逆方向の磁界を与えると、冷却時にその部分の磁化が反転して、マークが記録される。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。

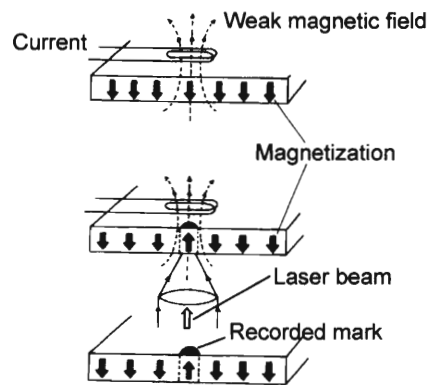


Fig. 4.1 A schematic illustration of MO recording.

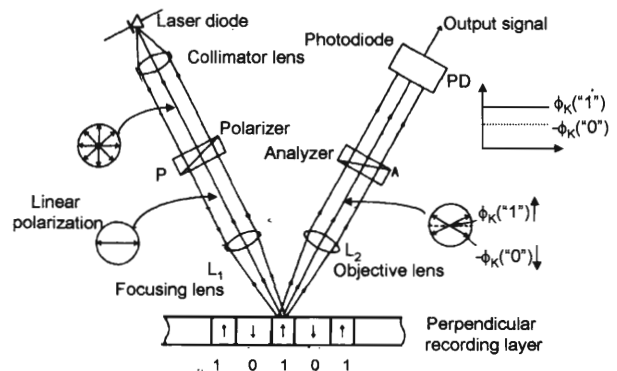


Fig. 4.2 A schematic illustration of MO reading.

### 4.3.2 再生の原理

光磁気記録された記録マークの磁気光学効果による再生について述べる。Fig. 4.2 に模式的に示すように、半導体レーザ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。

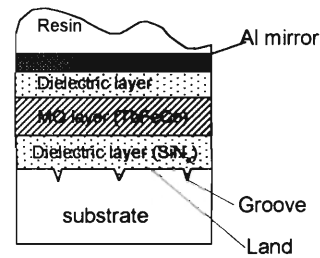


Fig. 4.3 Cross section of a MO disk.

### 4.4 光磁気ディスク媒体<sup>4,6)</sup>

#### 4.4.1 媒体の構造

Fig. 4.3 は 3.5 インチ光磁気ディスクの構造を模式的に示している。プラスチックの溝付き基板に、保護膜として透明な誘電体の薄膜が蒸着され、その上に光磁気記録用磁性膜がスパッタ法によって付けられており、さらに、保護膜と Al などの反射膜で覆われている。それぞれの膜厚は 0.1  $\mu\text{m}$  程度である。光強度変調直接重ね書き (LIMDOW) 用や、磁気誘起超解像 (MSR) 用のものでは、磁性膜の部分をさらに細分化した複合膜構造のものが使われる (4.8 に詳しく述べる)。反射層の上を樹脂で保護しディスクに仕上げる。レーザ光はプラスチック基板面から入射され、記録膜の表面に焦点を結ぶようになっている。盤面は非焦点面であるため盤面上の光スポットの大きさは直径数百  $\mu\text{m}$  程度となり、盤面についたほこりなどに影響を受けにくい。

#### 4.4.2 光磁気用磁性膜

光磁気記録に用いる材料は、熱磁気記録特性と磁気光学再生特性の両方の要請を満たしていなければならない。したがって、次のような条件が必要である。

- (1) 記録特性からの要請
  - ①  $T_c$  が低くレーザ加熱によって容易に磁化を失う
  - ②  $M_s$  が小さく小さな記録磁区が安定に存在する
  - ③ 熱的安定性が高い
  - ④ 熱伝導率が大きくレーザ光が離れるとすぐ冷却する
- (2) 再生特性からの要請

- ① 媒体ノイズが低い
  - ② 磁気カー回転角が大きい
  - ③ 垂直磁化で極カー効果を使える
  - ④ 反射率が高く検出に十分な反射光強度がある
- (3) 記録媒体としての要請

- ① 大面積で均質な膜が容易に低価格に製作できる
- ② 化学的、構造的に安定である

磁気特性から見た場合、特に重要なものは、まず、磁化が膜面に垂直に向いており、小さな磁区が安定に存在できることである。すなわち、垂直磁気異方性エネルギー定数 ( $K_u$ ) が反磁界の静磁エネルギー ( $2\pi M_s^2$ ) より大きく、さらに磁化  $M_s$  と保磁力  $H_c$  の積が大きいことが必要である。これは最小円筒磁区の直径  $d$  が  $M_s \cdot H_c$  積に逆比例するからである。

また、記録したマークを効率よく読み出すためには、媒体の再生性能が高いこと、媒体の表面が一様であることが要求される。このため磁気光学効果が大きいばかりでなく、表面の凹凸やピンホールがなく、記録マークの形状が歪まない材料が望ましい。

光磁気材料としては、Table 4.1 に示すように歴史的にさまざまな材料が検討されたが、現在では、アモルファス希土類遷移金属薄膜 (以下ではアモルファス R-TM 膜と略称) が定着している。

アモルファス材料は、大面積を均一に作るができること、低基板温度で製膜するのでプラスチック基板が使い

Table 4.1 Previously studied materials for MO recording

Form	Materials	Composition	Characteristics
Single crystal	Epitaxial Magnetic Garnets	(BiGdLuSm) <sub>3</sub> (FeAl) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (BiSmEr) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (TbYb) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> :Co	Chemically stable Large MO figure of merit High cost
Amorphous	Amorphous film	R-TM (Gd-Co, Gd-Fe, Tb-Fe, Gd-Tb-Fe, Tb-Fe-Co, Nd-Dy-Fe-Co etc.)	Curie point and compensation point recording High Sensitivity, Low noise Small rotation, Chemically unstable
Composite	Composite films	Garnet/CrO <sub>2</sub> Garnet/R-TM R-TM/R-TM R-TM/Pt-Co	Under investigation
Polycrystalline	MnBi-based film	MnBi MnBiCu	Large anisotropy, Large MO rotation Large media noise Unstable for repeated use
	MnMGe-based film	MnAlGe MnGaGe	Modest MO rotation High media noise
	Oxides	(BiDy) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> Bi <sub>3</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (CeY) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>3</sub> O <sub>12</sub> CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Large MO figure of merit Slightly high noise figure High processing temperature
	Superlattice	Pt/Co, Pd/Co, Pt/Fe, Au/Co etc	Large MO rotation in short wavelength High CNR Low H <sub>c</sub>
	Other Materials	PtCo, PtMnSb, USe, CeSb, UCo <sub>5</sub> , CoCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub>	In-plane anisotropy (PtCo, PtMnSb) Low Curie Temperature (USe, CeSb, UCo <sub>5</sub> , CoCr <sub>2</sub> Se <sub>4</sub> )

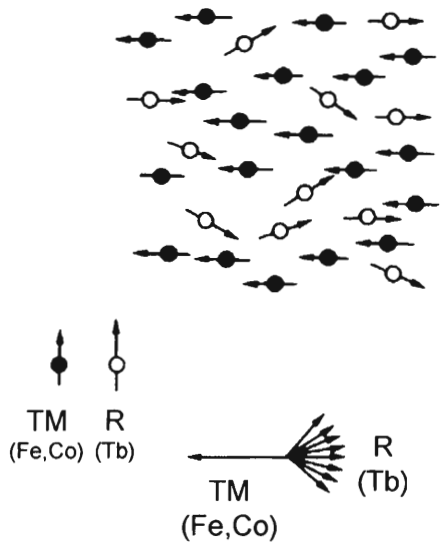


Fig. 4.4 Magnetic moment of TM (Fe, Co) and Tb atoms in amorphous TbFeCo thin films.

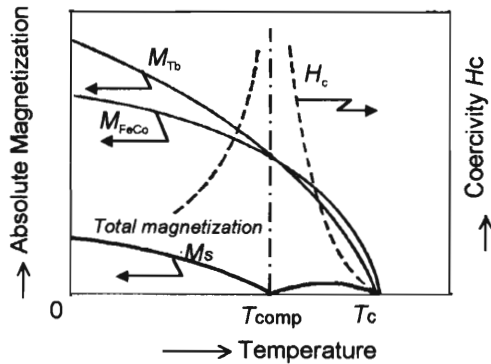


Fig. 4.5 Magnetization (sub-networks and total) of the R-TM film and coercivity plotted as a function of temperature.<sup>4,6)</sup>

ること、粒界がなくノイズレベルが低いことなどの特徴をもつ。さらに、アモルファス R-TM 合金薄膜は垂直磁化膜なので、記録密度の向上が見込めること、極カー回転が比較的大きいこと、キュリー温度が低く弱いレーザーでも十分な記録感度をとれること、補償温度をもち室温付近で記録磁区が安定であるなど多くの長所がある。

希土類 (R) としては主として Tb が、遷移金属 (TM) としては Fe, Co が使われている。一例としてアモルファス TbFe の磁性を説明する。Fig. 4.4 に模式的に示すように、Fe の磁気モーメントは強磁性的にそろい副ネットワーク磁化  $M_{Fe}$  をもっているのに対し、Tb の磁気モーメントの向きは分布をもち、その合成磁気モーメントが作る副ネットワーク磁化  $M_{Tb}$  は、Fe のそれと反強磁性的に結合している。Fig. 4.5 に TbFeCo の磁化の温度依存性を模式的に示す<sup>4,6)</sup>。実線で示すように  $M_{Tb}$  と  $M_{FeCo}$  とは温度依存性が異なるので、両者を合成した全磁化  $M_s$  (太い実線) には両者が打ち消しあってゼロとなる温度が存在する。この温度を補償温度 (compensation temperature:  $T_{comp}$ ) と称して

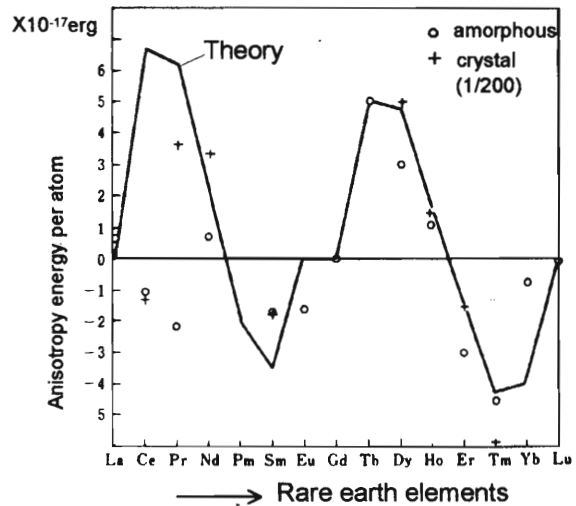


Fig. 4.6 Anisotropy of amorphous R-TM films plotted for different rare earth species.<sup>4,7)</sup>

いる。 $T_{comp}$  は Tb と FeCo の組成比を変えることで制御できるが、わずかな組成比の違いにも敏感である。 $T_{comp}$  以上では FeCo の磁化が優勢となり全体の磁化の向きは FeCo の磁化と同じ向きになる。一方、 $T_{comp}$  以下では、Tb の磁化が優勢となり全体の磁化は Tb の磁化方向を向くので、これと反強磁性的に結合している FeCo の磁化は全体の磁化とは逆方向になる。 $T_{comp}$  が室温付近にくるもの (Tb が約 25%) を補償組成、 $T_{comp}$  が室温より高いものを希土類リッチ組成、低いものを遷移金属リッチ組成と呼ぶ。Fig. 4.5 に見られるように、全磁化  $M_s$  は  $T_{comp}$  以上でいったん上昇した後緩やかに減少し、キュリー温度 (200°C 程度) 以上になると消失する。

アモルファス R-TM 合金の垂直磁気異方性については、スパッタ製膜時に R-R の原子対ができることが原因であるという説がある。Fig. 4.6 に示すように希土類の種類を変えることにより、大幅に変化することから<sup>4,7), 4,8)</sup>、R の 1 イオン異方性が寄与していることは確かで、膜構造の異方性が軌道の異方性をもたらし、スピン軌道相互作用を通じて磁気異方性に寄与しているというのが定説になっている。

アモルファス R-TM 合金の磁気光学スペクトルについては、第 3 回の 3.2.4 項で述べたのでここでは詳細について触れないが、現在光磁気記録に用いられている光源の波長 680 nm における磁気光学効果は主として TM から生じているので、 $T_{comp}$  においては全体の磁化がゼロであるにもかかわらず、磁気光学効果が観測される。

#### 4.4.3 基板材料、保護膜

光磁気ディスク媒体用の基板としては、次の条件を満たさなければならない。

- ①熱伝導率が小さいこと (記録・消去に要するレーザーパワーを小さくし、高密度化するため)
- ②耐熱性が大きいこと (製膜・レーザー照射時の温度上

Table 4.2 Substrate materials<sup>4,6)</sup>

Substrates	Optical properties			Thermal properties		Moisture transparency (g/m <sup>3</sup> )
	Transparency (%)	Birefringence (nm)	Photo-elasticity (10 <sup>-5</sup> mm <sup>2</sup> /kg)	Glass transition temperature (°C)	Thermal expansion (10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup> )	
PC	87-90	20-30	71	140-150	8	3.6
PMMA	92	20	6	90-100	8	2.8
Epoxy	93	<5	54	125	4-7	2.5
PO	93	<20	6	155	7	-
Glass	70	<1	3	540	0.3-1.2	0

昇に耐える)

- ③吸湿性が少ないこと (さびやすい媒体に水分を伝えない)
- ④表面硬度が高く、反りが少ないこと
- ⑤気体の透過性が低いこと
- ⑥耐候性、耐溶剤性が良好であること
- ⑦案内溝の作製が容易であること
- ⑧成形性がよく量産性があり、コストが低いこと

このような条件を満たす基板材料として、ガラスのほか、ポリカーボネート (PC), アクリル (PMMA), エポキシなどが研究された。Table 4.2 に種々の基板材料の物性を一覧を示す<sup>4,6)</sup>。ガラスは複屈折がなく、吸水性が低く、熱変形も受けにくいので基板材料としては申し分のない性能を持っているので、研究開発用の基板や保存用データファイルとして用いられる。PC は低価格で吸水性が小さいので、現在ほとんどの光磁気ディスクがこの材料を用いている。しかし、PC は複屈折が大きいのが欠点である。基板に不均一な複屈折があると直線偏光が乱れてノイズとして検出される。射出成形の技術を工夫して複屈折のばらつきを抑えている。PMMA は複屈折は小さいが、吸水性が大きいのが欠点である。エポキシは、複屈折、吸水性ともに良好であるが、価格の面から使われていない。またポリオレフィン系樹脂も複屈折が小さいがやはり価格の点からあまり採用されていない。

また、基板には、通常、0.6~1.0 μm 幅の光ガイド用の案内溝が 1.6 μm のピッチでらせん状にディスク上の全面に設けられている。この案内溝の作り方は、ガラスの場合、ポジ型のレジストを塗布して予備加熱した後、レーザーでらせん状に溝を記録し、反応性イオンエッチングによってガラス表面を直接エッチングするか、光硬化樹脂をスピコートした後、スタンプで溝付きの原盤を重ねて圧力を加えながら転写硬化させる光重合法によって作製する。PC や PMMA の場合は溝付き原盤を用いた射出成形法によって作るのがふつうである。ガラスに案内溝を作るには反応性エッチングを用いて直接加工する。

アモルファス R-TM 合金の泣きどころは、さびやすいことである。このため透明な誘電体膜を付けて酸化を防止するための技術が開発された。誘電体としては、SiO<sub>2</sub>, Tb 添加 SiO<sub>2</sub>, SiN<sub>x</sub>, AlN, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnS などが研究されたが、現在では、ほとんどのメーカーが SiN<sub>x</sub> を採用している。SiN<sub>x</sub> の表面処理がその上に製膜される R-TM 膜の構造、

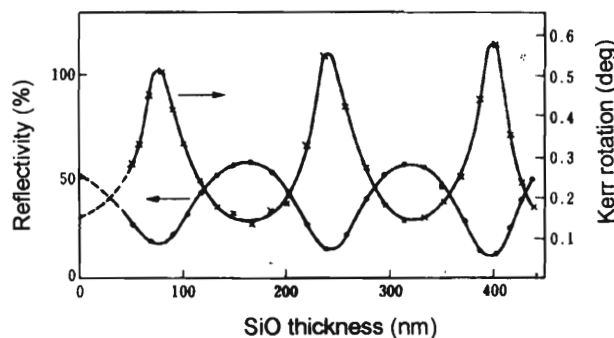


Fig. 4.7 Reflectivity and Kerr rotation in a multilayer with the dielectric/MO/dielectric/glass structure.<sup>4,9)</sup>

ひいては磁性に大きな影響を及ぼし、その結果、感度および C/N (carrier to noise) 比にも変化をもたらすことが知られている。

誘電体膜は保護膜としてのみならず、磁気光学効果を強めるという光学的な機能も果たしている。アモルファス R-TM 膜自身の磁気カー回転角は最大 0.5° 程度しかないが、誘電体膜と組み合わせて多層構造を作ることにより多重反射と干渉の効果を用いて、カー回転角を強めることができる。

Fig. 4.7 は、基板、誘電体膜、光磁気膜からなる多層膜構造におけるカー回転角・反射率の誘電体膜厚み依存性を示している<sup>4,9)</sup>。厚みを変えることによりカー回転角が増強されたり、減少したりしていることがわかる。カー回転が最大になる膜厚では反射率が極小になるので、実際の膜では両者の妥協を計り最適化される。

現在使われている光磁気媒体は、Fig. 4.3 のように、基板/誘電体膜/光磁気膜/誘電体膜/金属反射膜の構造をとっているが、この場合は、光磁気膜の表面で反射された光だけでなく、光磁気膜を透過し金属膜で反射されて再び光磁気膜を透過して戻ってくる光も利用されているので、カー効果とファラデー効果の両方が寄与している。しかし、第 1 回に述べたように、カー効果もファラデー効果も誘電率の非対角成分に起因し、いずれも対角成分の寄与も受けているのであるから、多層化は実効的に対角成分からの寄与を制御して磁気光学効果を増強しているものと解釈できる。

#### 4.5 記録のメカニズム

レンズを使ってレーザー光線を絞込み込むと、波長の程度の

小さなスポットにすることができる。正確にいうと、対物レンズの開口数を  $NA$  とすると、絞り込み可能な光スポット径  $d$  は波長を  $\lambda$  として、

$$d = 0.6\lambda / NA \quad (4.1)$$

で与えられる。ここに、 $NA = n \sin \alpha$  である。ただし  $n$  はレンズのまわりの媒体の屈折率、 $\alpha$  はレンズの開口角を表す。 $NA$  は 0.5 の程度の数値であるから、 $d$  は波長と同程度の大きさとなる。よく用いられる半導体レーザーの波長はおよそ 700 nm であるから、1  $\mu\text{m}$  以下の小さなスポットにレーザー光を集めることができる。記録時のレーザーパワーを 10 mW とすると、 $10^6 \text{ W/cm}^2$  という高いエネルギー密度である。この光を吸収して、磁気記録媒体の温度は 150~200°C 程度上昇する。照射された部分は Fig. 4.8 のようにガウス形の温度分布となる。

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。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す。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。外部磁界が広い領域に加わっていたとしても、加熱されて  $T_c$  以上になった部分のみが外部磁界による磁化反転を受けるので、狭い領域に選択的に記録マークを記録することが可能なのである。また、温度が  $T_c$  を超える部分は Fig. 4.8 からわかるように光スポットより小さいので、波長の数分の

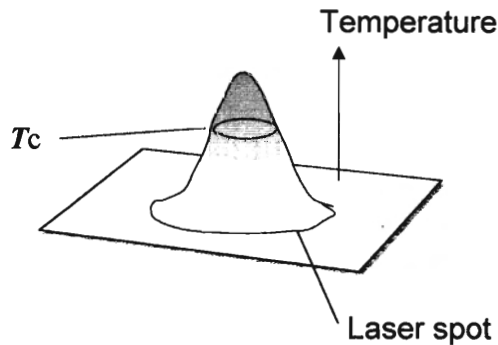


Fig. 4.8 Temperature profile in a laser spot.

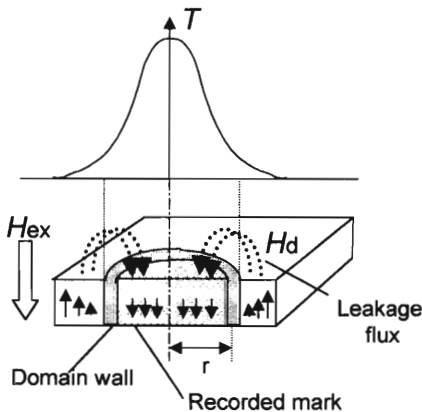


Fig. 4.9 A schematic illustration of the thermomagnetic recording process.

1 の磁区でさえも記録することが可能である。また、後述の磁界変調記録を採用すると、スポットが少しずつ移動して白の磁区と黒の磁区を重ね書きできるので、0.1  $\mu\text{m}$  以下の小さなマークでも記録することが可能となる。

記録磁区の安定性を決めるのが保磁力  $H_c$  である。 $H_c$  は、磁気異方性エネルギー定数  $K_u$  に比例し全磁化  $M_s$  に逆比例するので Fig. 4.5 に破線で示すように、 $T_{\text{comp}}$  で発散的に増大する。通常、光磁気膜には補償組成付近の組成 (Tb 25% 付近) を用いるので、室温付近での  $H_c$  が 10 kOe 程度の大きな値をもつように調整することが可能で、これにより記録された磁区が室温で安定に存在する。

磁区の大きさは次のように決まる。Huthによれば、垂直磁化膜において半径  $r$  の円筒状の磁区がどのような大きさで存在できるかは、磁気的エネルギーのバランスで決まる<sup>4,10</sup>。Fig. 4.9 に示すモデル図に従って磁壁に働く力の方程式を立てると、

$$H_c(r) = \left| H_{\text{ex}} + H_d - \frac{\sigma_w}{2rM_s} - \frac{\partial \sigma_w}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{1}{2M_s} \right| \quad (4.2)$$

となる。左辺は保磁力、右辺第 1 項は外部磁界、第 2 項は考えている磁界の周辺からの漏れ磁界、第 3 項は磁壁のエネルギーの曲率に起因する磁界、第 4 項は磁壁エネルギーの温度勾配と温度の位置微分からくる磁界である。外部磁界と漏れ磁界は磁区を拡大する方向に働き、磁壁のエネル

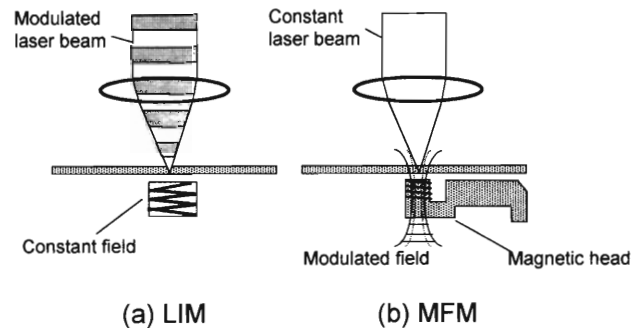


Fig. 4.10 (a) LIM (light intensity modulation) and (b) MFM (magnetic field modulation).

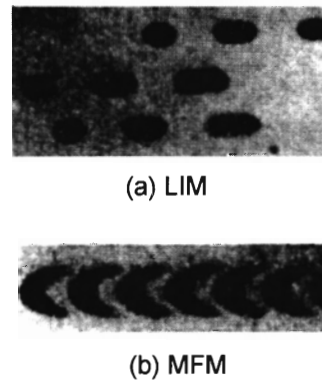


Fig. 4.11 Images of recorded marks formed by two types of modulation: (a) LIM<sup>4,11</sup>; (b) MFM<sup>4,12</sup>.

ギーや磁化の勾配は  $H_c$  を下げ磁区を縮小する方向に働く。  $H_c, H_d, M_s, \sigma_w$  は温度の関数であるから、レーザスポット内の温度分布を考慮して、式(4.2)をコンピュータによってシミュレートすることができる。シミュレーションの結果、  $0.5 \mu\text{m}$  以下の磁区でも十分安定に存在できることが示されている。

#### 4.6 変調方式

電気信号をどのようにして光磁気記録しているのだろうか。記録のやり方には Fig. 4.10 に模式的に示すように2種類あって、(a) 記録したい電気信号をレーザ光の強弱に変えて記録する「光強度変調 (LIM) 記録方式」と、(b) 光信号の強度はそのまま磁界の強さを変調する「磁界変調 (MFM) 記録方式」とがある。LIM 方式で記録されたマークは、Fig. 4.11(a) のように、長円形<sup>4.11)</sup>であるが、MFM で記録されたマークは Fig. 4.11(b) に示すように矢羽根形状<sup>4.12)</sup>となる。LIM の利点は磁気ヘッドを必要としないためドライブがシンプルになることであるが、重ね書きのためには、次節に述べるようなやや複雑な交換結合膜を用いる必要がある。一方、MFM 方式では磁気ヘッドを必要とし、十分な浮上量を確保するためには強い磁界を必要とするため、ドライブの構成がやや面倒であるが、通常の磁気記録と同じであるから重ね書きが容易で、小さな記録磁区を安定に記録できるという利点をもつ。

現行の MO ディスクは LIM 方式であるが、次世代の AS-MO 規格では重ね書きが容易な MFM を採用する。一方、ミニディスク (MD) は当初から MFM 方式を採用している。MD は回転速度が遅いので、磁気ヘッドは媒体に直接接触している。

#### 4.7 光学系とサーボメカニズム

##### ①光ヘッド:

光ヘッドは Fig. 4.12 に示すように半導体レーザ、ビームスプリッタ、対物レンズ ( $NA=0.5$  程度)、サーボ用4分割フォトダイオード、偏光ビームスプリッタ、信号検出用フォトダイオード、レンズ移動用アクチュエータなどから構成される。半導体レーザの波長は  $780\sim 640 \text{ nm}$  程度、膜面における光強度は記録時  $10 \text{ mW}$  程度<sup>\*1</sup>、再生時  $1\sim 3 \text{ mW}$  程度である。半導体レーザのビーム断面は楕円状なので、ビーム成形プリズムを用いるとともに斜め入射によって円形に変換している。媒体からの反射光はビームスプリッタで検出系に導かれる。

信号検出系では偏光ビームスプリッタ (または、ウォラストンプリズム) で p 偏光、s 偏光に分割しそれぞれフォトダイオードで検出され、差動方式で CN 比を稼いでいる。ミニディスクについては、いくつかの光学部品を一体化

\*1 光変調直接重ね書き (LIMDOW) の場合には、1 と 0 とで異なった光強度が用いられる。

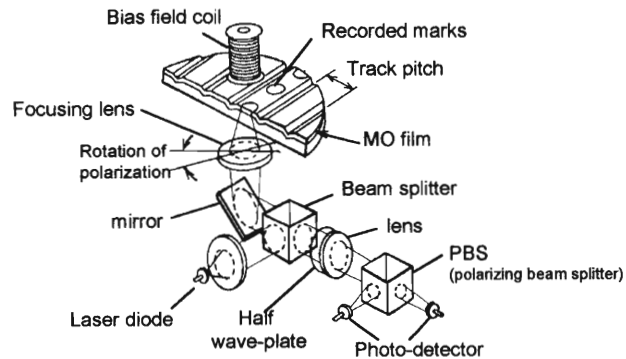


Fig. 4.12 A schematic illustration of the optical head.<sup>4.6)</sup>

した光ヘッドが開発され、実装・調整作業の簡略化、ひいては、ドライブの低価格化が図られている<sup>4.13), 4.14)</sup>。

##### ②サーボ:

レーザ光を常に磁性体膜上に結像するよう、フォーカス・サーボとトラッキングサーボの二つのサーボ機構が使われている。フォーカスサーボは非点収差、トラッキングサーボは、3ビーム法、プッシュプル法などがよく使われる。

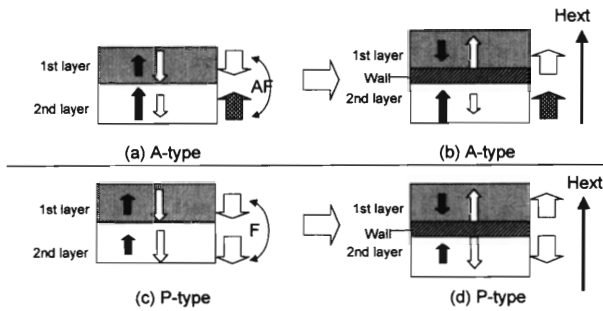
#### 4.8 交換結合多層膜の応用

光磁気ディスクでは、さまざまな形で磁性多層膜における層間の交換結合が用いられる。一つは、機能分散である。熱磁気記録と、磁気光学読み出しとを、それぞれの機能に適した膜に分担させ、両層を適当に結合させる方法である。例えば、キュリー温度が高く室温での磁化が大きいためカー回転も大きい GdFeCo を読み出し層として用い、保磁力が大きくキュリー温度が低い場合記録感度が高い TbFeCo とを交換結合すると、記録感度、再生信号ともに大きな光磁気媒体を作ることができる。もう一つは、熱磁気転写の利用である。これを利用しているのが、光変調式直接重ね書き (LIMDOW) 技術と磁気誘起超解像 (MSR) 技術である。以下では、はじめに交換結合多層膜における交換結合の原理を述べ、実例として LIMDOW および MSR について解説する。

##### 4.8.1 交換結合の原理<sup>4.15)</sup>

アモルファス R-TM 合金系において、交換相互作用は TM の磁気モーメント同士を平行に、R の磁気モーメント同士も平行にし、R の磁気モーメントと TM のそれを反平行にするように働く。このため、一般にアモルファス R-TM 膜はフェリ磁性体である。これは、重希土類について成り立つことで、軽希土類では、強磁性的に働くことが知られている<sup>\*2</sup>。光磁気記録に使われる膜は主として重希土類を用いているので、以下、希土類という場合重希土類を指すものと考えていただきたい。

\*2 周期表において Eu より原子番号の大きい希土類を重希土類、Eu より原子番号の小さい希土類を軽希土類と呼ぶ。



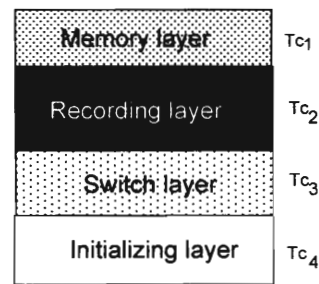
**Fig. 4.13** Schematic illustration of A-type and P-type exchange-coupled layers with and without external magnetic field.<sup>4,16)</sup>

組成や構成元素が異なる複数の磁性膜を積層して多層膜を作るとき、その界面が十分に清浄であれば、各層を構成する原子同士が電子を交換できるようになり、層間に交換相互作用が働くようになる。このような多層膜のことを「交換結合多層膜」と呼んでおり、交換結合を制御した材料という点で、広い意味の量子材料と見なすことができる。

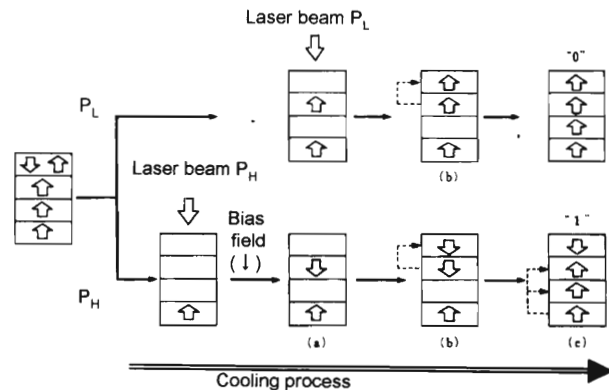
組成や構成元素の異なる2種類のアモルファス R-TM 層からなる交換結合膜を考えよう。各層は独立の磁性膜として、それぞれの保磁力  $H_c$ 、飽和磁化  $M_s$  をもつが、界面で隔てられた二つの層の R 同士、TM 同士には互いに平行になろうとする交換力が働く。Fig. 4.13<sup>4,16)</sup> は、一例として、A-type (第1層に、室温では TM のモーメントが支配的である組成の層を、第2層に R のモーメントが支配的である層をおいた場合) と、P-type (第1層、第2層ともに TM のモーメントが支配的な膜) の2種類の2層膜における交換結合の様子を表している。A-type (上段) において、磁界ゼロの場合左図 (a) のように、全体の磁気モーメント間は反強磁性的な結合になるが、TM 同士、R 同士は平行であるから界面の副ネットワーク磁化は連続で磁壁はできない。十分強い磁界を印加した場合、右図 (b) のように合成磁化同士が平行になるため、R 同士、TM 同士は反平行になり、界面磁壁が生じる。一方、P-type (下段) において磁界ゼロの場合、右図 (c) のように各モーメント、全体のモーメントともに平行なので界面磁壁は生じない。もし第2層の  $H_c$  よりも大きい第1層の  $H_c$  より小さな磁界を加えると、両層の各原子の磁気モーメントは反平行になるので、界面磁壁が生じる。このように交換結合膜では、さまざまな磁化状態の組み合わせを作ることができる。また、磁化を見ると、カー効果のように特定の構成元素からの寄与を見るのではヒステリシスループの形状も異なってくる。

#### 4.8.2 光強度変調直接重ね書き

まず、LIMDOW ディスクについて述べる<sup>4,17)</sup>。以前の光変調型光磁気ディスクは直接の重ね書き (オーバーライト) ができなかったが、このディスクでは Fig. 4.14 に示すようなキュリー温度の異なる4層 (①メモリ層/②記録層/③



**Fig. 4.14** Cross sectional view of the LIMDOW disk ( $T_{C4} > T_{C2} > T_{C1} > T_{C3} > RT$ ).



**Fig. 4.15** Mechanism of LIMDOW.<sup>4,17)</sup>

スイッチ層/④初期化層) からなる多層膜 (あるいは5層以上の膜) を用い、光の強度を変調することにより重ね書きを行う。4層のキュリー温度は、 $T_{C4} > T_{C2} > T_{C1} > T_{C3} > RT$  の関係を満たす必要がある。

重ね書きのプロセスを Fig. 4.15 に説明する。初期状態で各層の磁化は左端の図のようであったとする。“0”を重ね書き記録するときは弱い光 (強度  $P_L$ ) を照射し、“1”を重ね書き記録するときは強い光 (強度  $P_H$ ) を照射する。光照射の後に続く冷却過程でどのようなプロセスが起こるかは、“0”については上段に、“1”については下段に示されている。

弱い光 (強度  $P_L$ ) では、第3層 (スイッチ層) が常磁性に転移する。このときメモリ層は交換結合によって記録層の磁化と同じ上向き (“0”) に記録される。最後にスイッチ層も “0” になる。したがって、初期状態が 0, 1 いずれであってもメモリ層には “0” が記録されることとなる。

一方、強い光 (強度  $P_H$ ) を照射すると、下段のように最下層 (初期化層  $T_c = T_{C4}$ ) を残してすべての層が常磁性となる。冷却していくとき “1” に相当する下向きのバイアス磁界をかけておくと、第2層 (記録層) が最初にキュリー温度 ( $T_{C2}$ ) 以下となり下向き (“1”) に磁化される。次に第1層 (メモリ層) が  $T_{C1}$  以下になるとき第2層との交換結合で “1” になる。さらに冷却すると最後に第3層 (スイッチ層) が  $T_{C3}$  以下となるがこのとき第4層との結合で第3層 (スイッチ層) は “0” となり、この時点ではもはやバイアス磁界はないので第2層 (記録層) も “0” になる。ただし、こ



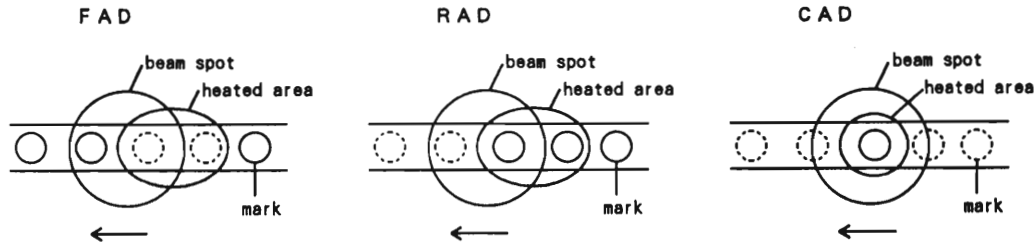


Fig. 4.16 Three types of magnetic super resolution (MSR); FAD, RAD, and CAD.<sup>4.19)</sup>

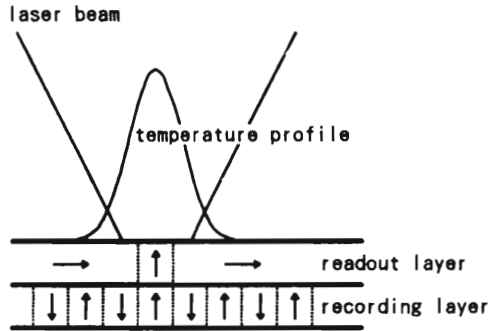


Fig. 4.17 A schematic explanation of CAD-MSR.

のときメモリ層の保磁力は非常に大きく、“1”の状態を維持する。したがって、この場合、最上層と第2層の間には界面磁壁が生じている。ISO規格として市販されている230 MB, 640 MBのオーバーライトMOディスクは、このようなメカニズムを利用している。

#### 4.8.4 磁気誘起超解像

次に、MSRディスクについて述べる。これは、読み出しに用いるレーザの波長よりも小さなマークを読み出すための技術である<sup>4.18)</sup>。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、Fig. 4.16に示すように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）という三つの再生方式がある<sup>4.19)</sup>。FAD, RADのポイント、読み出しの際のレーザ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、読み出し層のビームスポットの後ろの部分をマスクすることにより、開口を小さくする。一方、RADでは読み出し層をあらかじ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、Fig. 4.17のように、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。この状態での光磁気信号は“0”となるため、記録状態を再生しても信号は現れない。しかし、レーザ光で加熱すると中心部だけの異方性が垂直方向を向くようになり、交換結合により記録層の磁区が読み出し層に転写される。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

Table 4.3 ASMO technologies

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

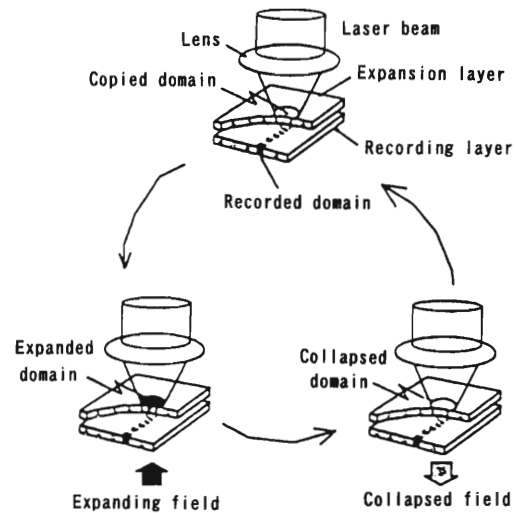


Fig. 4.18 Mechanism of MAMMOS.<sup>4.21)</sup>

で、隣接トラック上の記録磁区からの漏れ信号が減少し、トラック密度を高めることができるという特徴をもつ。

1998年に市場に出たGIGAMOと呼ばれる1.3 GBの容量をもつ3.5インチMOディスクは、MSRを利用した初めての市販品である<sup>4.20)</sup>。このMSRはRADの一種で、レーザビームの前部と後部にマスクを作り開口部を狭くすることができるダブルマスクRAD方式と呼ばれるものを使っている。赤色のレーザ波長（1.0  $\mu$ mの光スポット径）で0.3  $\mu$ mの記録マークを再生している。

次世代のMO規格であるAS-MOでは5インチディスクで6 GBの記録容量が達成されるが、これには、高密度化のために研究されてきたほとんどの技術が取り込まれている。その中でキーを握るのがMSR技術である。Table 4.3にAS-MOの諸元を掲げる。2000年発売予定のデジタルカメラ用2インチMOディスク（730 MB）はAS-MO規格に準拠している。



#### 4.9 磁区拡大再生

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で読みとっているが、ビームの利用効率が悪くなるので信号強度は小さくなってしまいます。これを解決しようというのが Fig. 4.18 に模式的に示す磁区拡大再生である<sup>4.21)</sup>。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消失する。このような磁区の拡大はかつてバ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と称している。LLG(Landau-Lifshitz-Gilbert)方程式を用いたシミュレーション<sup>4.22)</sup>によれば、転写と拡大は非常に短時間で起こり、2 ns程度でビーム径程度に拡大する。転写の過程では、記録層からの磁界のうち横方向の磁場勾配が重要で、したがって、記録層に書かれた磁区の外周の直上付近でかつ読み出し層の磁気異方性の弱い部分から磁化反転が開始される。磁区拡大の過程で、磁壁はブロッホ磁壁になったり、ネール磁壁になったり、非常に複雑な動きをする。

このほか、一方の磁壁のみを動かして磁区拡大を図り信号強度の増大を目指すDWDDという磁区拡大再生も提案されている<sup>4.23)</sup>。

#### 4.10 まとめと今後の展望

今回の講座では光磁気記録の原理と実際について述べてきた。磁気光学の基礎という点からはやや逸脱したのであるが、光磁気記録のあらゆる要素技術に磁気物理の基本が応用されている点をご理解いただければと願い記述した。

光磁気記録のさらなる発展として、SIL(solid immersion lens)をHDDのスライダに搭載し記録再生するfirst surface MO技術<sup>4.24)</sup>、波長多重光磁気記録<sup>4.25)</sup>、記録媒体を多層化して媒体を立体的に利用する3次元MO技術<sup>4.26)</sup>、さらには、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<sup>4.27)</sup>、<sup>4.28)</sup>など、多くの新技術の萌芽が見られる。これらについては、本学会主催のMORIS(光磁気記録国際シンポジウム)のシリーズを中心に議論が進んでいるので、詳細については、MORISのProceedingsをご参照願いたい。

原稿を丁寧に読んで修正箇所をご指摘いただきました栗野博之博士(日立マクセル(株))に深く感謝します。

#### 参考文献

- 4.1) 佐藤勝昭: 光と磁気(朝倉書店, 東京, 1988)。

- 4.2) 佐藤勝昭, 片山利一, 深道和明, 阿部正紀, 五味 学: 光磁気ディスク材料(工業調査会, 東京, 1993)。  
4.3) J. Saito, M. Sato, H. Matsumoto, and H. Akasaka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**(Suppl. No. 4), 155 (1987)。  
4.4) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, and K. Watanabe: *Proc. SPIE*, **1499**, 209 (1991)。  
4.5) A. Takahashi, M. Kaneko, H. Watanabe, Y. Uchihara, and M. Moribe: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**(Suppl. No. S2), 67 (1998); S. Sumi, A. Takahashi, and T. Watanabe: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 173 (1999)。  
4.6) 寺尾元康, 太田憲雄, 堀籠信吉, 尾島正啓: 光メモリの基礎(コロナ社, 東京, 1990)。  
4.7) Y. Suzuki, S. Takayama, F. Kitino, and N. Ohta: *IEEE Trans. Magn.*, **23**, 2275 (1987)。  
4.8) R. Sato, N. Saito, and Y. Togami: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L266 (1985)。  
4.9) T. Chen, D. Cheng, and G. B. Charlan: *IEEE Trans. Magn.*, **16**, 1194 (1980)。  
4.10) B. G. Huth: *IBM-J. Res. Dev.*, **18**, 100 (1974)。  
4.11) M. Takahashi, H. Sukeda, M. Ojima, and N. Ohta: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **63**, 3838 (1988)。  
4.12) M. Takahashi, H. Sukeda, T. Nakao, T. Niihara, M. Ojima, and N. Ohta: *Proc. Int. Symp. Optical Memory*, Kobe, 1989, p. 323 (1989)。  
4.13) S. Horinouchi, F. Kobayashi, S. Takeuchi, and T. Koga: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **20**(Suppl. No. S1), 315 (1996)。  
4.14) N. Nishi, K. Toyota, and K. Saito: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 245 (1999)。  
4.15) 網島 滋: 日本応用磁気学会誌, **15**, 822 (1991)。  
4.16) T. Kobayashi, H. Tsuji, S. Tsunashima, and S. Uchiyama: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, 2089 (1981)。  
4.17) 中木義幸, 深見達也, 徳永隆志, 田口元久, 堤 和彦: 日本応用磁気学会誌, **14**, 165 (1990)。  
4.18) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, and K. Watanabe: *Proc. SPIE*, **1499**, 209 (1991)。  
4.19) A. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **19**(Suppl. No. S1), 273 (1995)。  
4.20) K. Shono: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 177 (1999)。  
4.21) H. Awano, S. Ohnuki, H. Shirai, N. Ohta, A. Yamaguchi, S. Sumi, and K. Torazawa: *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4257 (1996)。  
4.22) N. Hayashi, Y. Nakatani, H. Awano, and N. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 151 (1999)。  
4.23) T. Shiratori, E. Fujii, Y. Miyaoka, and Y. Hozumi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**(Suppl. No. S2), 47 (1998)。  
4.24) B. D. Terris, H. J. Mamin, and D. Rugar: *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 141 (1996)。  
4.25) K. Shimazaki, M. Yoshimoto, O. Ishizaki, S. Ohnuki, and N. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **19**(Suppl. No. S1), 429 (1995)。  
4.26) A. Itoh, K. Nakagawa, K. Shimazaki, M. Yoshihiro, and N. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 221 (1999)。  
4.27) H. Nemoto, H. Saga, H. Sukeda, and M. Takahashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 229 (1999)。  
4.28) H. Katayama, S. Sawamura, Y. Ogimoto, J. Nakajima, K. Kojima, and K. Ohta: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**(Suppl. No. S1), 233 (1999)。

(1999年7月7日受理)

佐藤勝昭 さとう かつあき

昭39 京都大学工学部電気工学科卒, 昭41 同大学院工学研究科修士課程修了, 同年 日本放送協会入局, 昭43 同放送科学基礎研究所, 昭59 東京農工大学工学部助教授, 平1 同教授, 現在に至る。

専門 磁気光学

(工博)