



光磁気ディスクメモリ

太田 賢司・加藤 昭七

シャープ(株)中央研究所 〒632 天理市櫛本町 2613-1

(1985年3月6日受理)

Magneto-optical Disc Memory

Kenji OHTA and Shohichi KATOH

Central Research Laboratory, Sharp Corporation,
2613-1, Ichinomoto-cho, Tenri 632

1. はじめに

情報化社会の進展に伴い、情報を収集する時代から選別する時代へと、世の中の流れが変わりつつある。そのため、情報の書き換えが可能な小型大容量メモリの必要性がますます高まっている。

この分野では、従来、磁気ディスクや磁気テープ等の磁気メモリが主流であった。最近、記録材料はやはり磁性体であるが、記録、再生の手段として光を用いる光磁気ディスクメモリの研究開発が盛んになっている。

この光磁気メモリの特徴として

- 1) 記録ビットの大きさが集光した光のビーム径で決まるため、非常に高密度なメモリとなる(原理的には 10^8 ビット/cm²以上が可能)。
 - 2) ディスクメモリのため、磁気テープと比べるとアクセスタイムが短い。
 - 3) 記録媒体とヘッドの間隔を1mm程度あけることができるため、ヘッドの接触によるトラブルがない。
 - 4) ディスクに刻まれた案内溝にそって、光ビームを追従させ、記録、再生、消去を行なうため、高密度メモリにもかかわらず、ディスク交換が容易であり、装置当りの記憶容量を非常に大きくできる。
- 等が挙げられる。

本稿では、光磁気ディスクメモリの概要と現状を紹介する。

2. 記録, 再生, 消去の方法

2.1 記録と消去

光磁気ディスクに信号(ビット)を記録あるいは消去する方法を図1を用いて説明する。光磁気メモリ用記録媒体の磁化容易軸は、膜面に垂直であり、膜作製直後は一般に膜面上向きと下向きの磁区がランダムに並んでいる。そこで図1(a)のように膜の保磁力 H_c よりも強い磁場 H_0 をかけ、磁化 M を一方向にそろえて信号の消去状態を作る。次いで H_c よりも弱く H_0 と逆向きの外部磁場 H_{ex} をかけておき、レーザー光を集光して媒体の温度を上昇させ、その部分の保磁力を減少させ H_{ex} の向きに磁化を反転さす(図1(b))。レーザー照射をやめると、磁化は反転したまま元の大きさに戻り信号が記録されたことになる(図1(c))。

記録されたビットの消去は、外部磁場 H_{ex} の向きを記録時と反対にしてレーザー光を照射すればよい。

2.2 信号の再生

記録された信号の再生は、カー効果やファラディ効果を利用して行なわれる¹⁾。図2に、カー効果を用いる場合の再生光学系の基本図を示す。偏光子を通過した直線偏光が磁性膜に入射すると、反射光は、カー効果により方位角が θ_K (カー回転角)だけ傾いた光となり、ハーフミラーで反射されて検光子を通過する。記録された信号すなわち磁化の向きにより θ_K は正負に変化するので図3のごとく検光子の透過軸を入射偏光の振動面(縦軸)から 90° 傾いた位置(横軸)より θ だけ傾けておくと、検光子を通過する光は、図中の矢印AになったりB

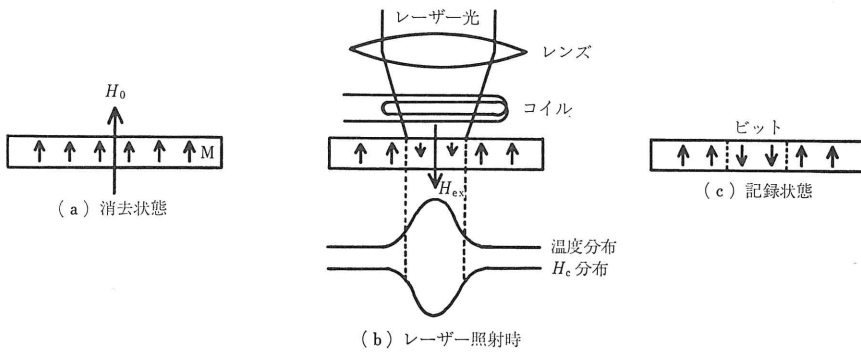


図1 光磁気記録の方法

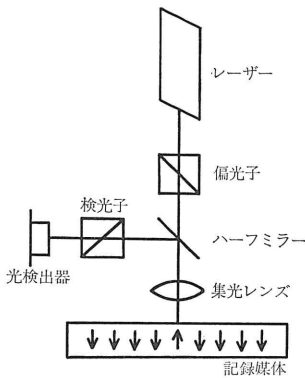


図2 再生光学系

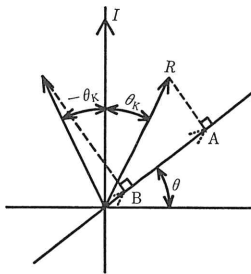


図3 光磁気再生の原理
I: 入射偏光, R: 反射偏光.

になったりする。光検出器で光量変化を電流変化にかえれば、信号検出ができる。

3. 記録材料

光磁気ディスク材料として必要な性質は、

- 1) 高密度記録ができ、しかもその記録ビットの径が変わらないこと。
- 2) 記録感度が適当であること。

3) 再生信号品質がよいこと。

等がある。これらの項目を充たすために、記録材料として

a) 垂直磁化膜で保磁力が大きいこと (通常 $H_c > 1$ kOe)。

b) キュリ温度 (T_c) が適当 ($100 \sim 200^\circ\text{C}$) であること。レーザー光の一部を吸収すること、熱伝導率が小さいこと。

c) カー回転角と反射率が大きいこと。
等を充たす材料が望ましい。

現在まで検討されているおもな材料を表1に示す。代表的なのは MnBi 膜と希土類鉄系の膜である。前者は1960年代後半から1970年代前半にかけて勢力的に研究がなされた材料である¹³⁾。上記の基本的な性質(a)~c))の多くを充たしているが、 T_c が 360°C と高いため、記録、消去時に大型のレーザーが必要であり、そのため装置全体が大きくなるのが難点であった。また、MnBi は、 360°C を境に高温相と低温相とが存在する結晶性の膜であり、通常は、低温相を記録膜にするが、記録時に微小部分の相転移を伴うため、記録消去の回数が増すと、両相の混在した膜になり、信号品質が低下する欠点もあった¹⁴⁾。そのため実用化には至らず、現在はほとんど検討されていない。

代わって登場した希土類遷移金属 (RE-TM) の薄膜は、記録感度が適切であり⁵⁾、半導体レーザーを使用すると、小型で大容量なメモリ装置が作れると考えられた。もちろん70年代中頃から、半導体レーザーや、光ディスクメモリの諸技術の進歩発展があり¹⁵⁾両者が相俟って RE-TM (rare earth-transition metal) の膜が、現在研究開発の中心となっている。

しかし、RE-TM 膜の θ_K は 0.3 度程度と小さく、再生信号品質が低いことが大きな欠点であった。そこで他

表 1 おもな光磁気材料

	材 料	キュリ点 (°C)	カー回転角 (度) ファラディ回転角 (度/cm)	参考文献
(1)	MnBi 高温相	180	$*\sim 2 \times 10^5$	2)
(2)	MnBi 低温相	360	$*5 \times 10^5$	3)
(3)	MnBiCu	200	$*4 \times 10^5$	4)
(4)	GdCo	**	$*1.8 \times 10^5$	5)
(5)	TbFe	140	0.3	6), 7)
(6)	GdTbFe	170	~ 0.35	7)
(7)	GdTbFeCo		~ 0.45	8)
(8)	GdFeCoBi		0.48	9)
(9)	GdFeCo		~ 0.5	10)
(10)	TbCo	**	0.33	11)

* ファラディ回転角, ** 補償点記録¹²⁾をする材料.

(1)~(3): 多結晶, (4)~(10): アモルファス.

の元素を加えて θ_K を増加させる試みがなされている.

おもな物は, RE-Fe 系の Fe 原子の一部を Co で置換する方法¹⁰⁾と, Bi 等原子半径の大きな元素を添加する方法^{16, 17)}がある. 前者は θ_K を倍加させうが T_c も上昇するため記録感度が低下する. 後者は, それほど大きな θ_K の増加例が報告されていない. いずれにしても, 現状では, 他の特性 (T_c や H_c 等) をそのままにして θ_K だけを増大させることが困難であるため, 記録再生装置との整合を図りながら実用化を進めなければいけないだろう.

4. 多層膜構造

再生信号品質を改善する方法として, 多層膜構造により θ_K を増大させる方法がある. 具体例のいくつかを紹介する. まず, 磁性ガーネット膜に RE-Fe 膜をつけ, RE-Fe 膜に記録したビットをガーネット膜に転写し RE-TM 膜のカー効果とガーネット膜のファラディ効果を利用して θ_K' (実際には RE-Fe の θ_K とガーネットのファラディ回転角 θ_F の 2 倍とが合わさったものであるが, 図 2 の再生方法をとると θ_K と同じ効果になるので, θ_K' と表記する) を増大させる方法がある¹⁸⁾. これは, 反射率を減少させないで θ_K' を大きくできるので有用な方法であるが, 磁性ガーネットを成長させるための GGG 基板を大きくすることが困難なことと値段が高いため, 現時点では実用化がむずかしいと思われる.

また, θ_K は大きい, H_c が小さかったり T_c が高いため記録ビットの安定性や記録感度に難のある材料と, θ_K は小さいが, その他の条件を充たす材料を積層し, 後者で記録条件を定め, 前者で再生条件を定める方法がある^{19, 20)}. この方法は, 正確には θ_K の増大方法で

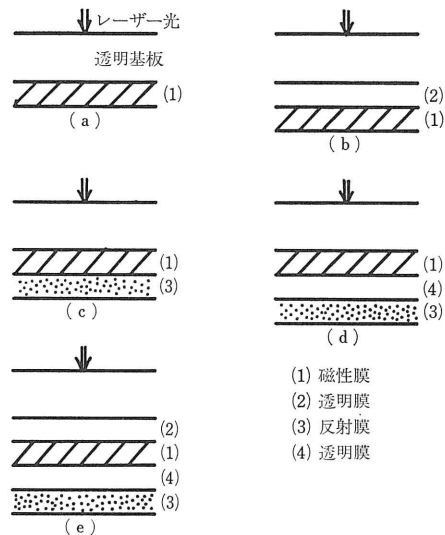


図 4 多層膜構造

はないが, 磁性膜に役割分担させることで, 材料選定の幅が広がり, 光磁気記録媒体の改善を楽にする長所がある.

磁性膜と非磁性の透明膜や反射膜を重ね θ_K を増大させる方法も一般的である²¹⁾. 代表的なものを図 4 に示す.

光磁気ディスクでも, 他の光ディスクメモリと同じく透明基板側から記録再生用の光が入射するのが普通であるため, 各図における膜の順序は, それを前提としている. (a) は, 通常の単層膜である. (b) は磁性膜と基板との間に透明膜を挟み反射防止構造とすることで θ_K を増大させる方法である. (c) は磁性膜を薄くし裏面に反射膜を設けて, 磁性膜を通過してくる光を再び元に返

し、そのとき磁性膜で受けているファラディ効果をも利用しようとする方法である²²⁾。すなわち、(1)と透明基板との界面で生じる θ_K と(1)を通過するとき生じる θ_F とを合わせて θ_K' を大きくする方法である。(d)は(c)における反射膜(3)の反射率を高めるために、透明膜(4)を反射率増大膜として挿入した構造である²³⁾。(e)は(b)と(d)を合わせた構造である。このような多層膜構造は、磁性膜のもっている磁気光学的特性を最大限に利用するものであり各膜の屈折率がわかれば最適構造は容易に計算できる²¹⁾。

このような膜構造の検討で信号品質を倍程度改善できるが、実用化の観点からすると、多層膜にするため工程数の増加と図4の例では干渉効果を利用するため各膜の膜厚制御等が問題となる。

5. 記録媒体の信頼性

実用化検討において往々最後に残りしかもいばん重要な問題が記録媒体の信頼性の有無である。光磁気メモリの基本的特性の改善とともに、信頼性検討も盛んになってきた。とくに、RE-TM 膜は、RE や Fe が酸化しやすいたことが大きな問題である。

媒体劣化の現象としては、高湿度下において生じるピンホールと、RE の選択酸化による H_c の変化とが顕著である。RE-TM 膜は、RE と TM とのスピンの反平行に並んだフェリ磁性体であるが、RE が酸化されると磁性に寄与する RE 原子が少なくなり、見かけ上 TM が増加したような磁気特性を示す。図5の H_c と θ_K の RE 組成依存性が示すように、RE の減少により θ_K はほとんど変化しないが、 H_c が大きく変わる。これが選択酸化による H_c 変化の原因である。

ピンホールはビットエラーに、 H_c 変化は記録感度の変化に関係する劣化である。ピンホールに関しては、第3元素の添加が有効であり、たとえば、TbFe に Co や Ni を添加したり、Al を加えたりすると大幅な改善が

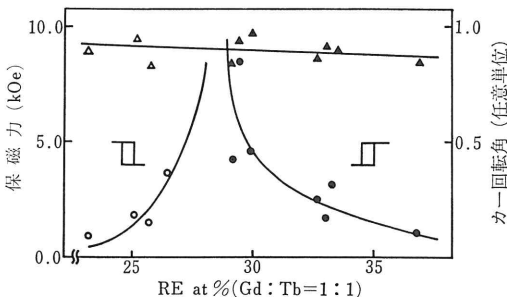


図5 GdTbFe の H_c と θ_K の組成依存性
 Δ, \blacktriangle : カー回転角 (θ_K), \circ, \bullet : 保磁力 (H_c)

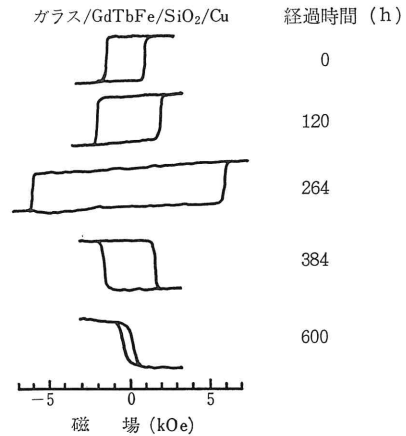


図6 80°C 大気中放置時のカーヒステリシスの変化



図7 4層膜構造

みられると報告されている²⁴⁻²⁶⁾。 H_c の変化に関しては、保護膜が重要でありたとえば図6に示すように GdTbFe 上に SiO_2 と Cu を積層した場合、80°C の保存テストを行なうと約 300 h でヒステリシスループが反転してしまう。ところが図7に示すように GdTbFe を AIN で挟んだ構造では同じ 80°C 保存での H_c 変化が非常に少なくなる²⁷⁾。

図8の(a)は、図7の構造の膜の各温度保存における H_c 変化であり、(b)は H_c が 10% 変化するところを寿命と考えておのおのデータからアレニウスプロットにより 20°C での保存性を調べた図である。約 1.4×10^6 h の寿命があることがわかる。同時に測定された θ_K が実験期間中に変化していないことから、信号の再生特性は記録感度よりも長期保存に対して安定であるといえる²⁸⁾。

6. 記録、再生光学系

光磁気メモリの記録、再生を行なう光学系は、すでに商品となっている VD や CD の技術を利用し、小型高性能なものになってきている。

図9は筆者らが試作した光ヘッドである²⁹⁾。種々の試作ヘッドが発表されているが、基本的には、

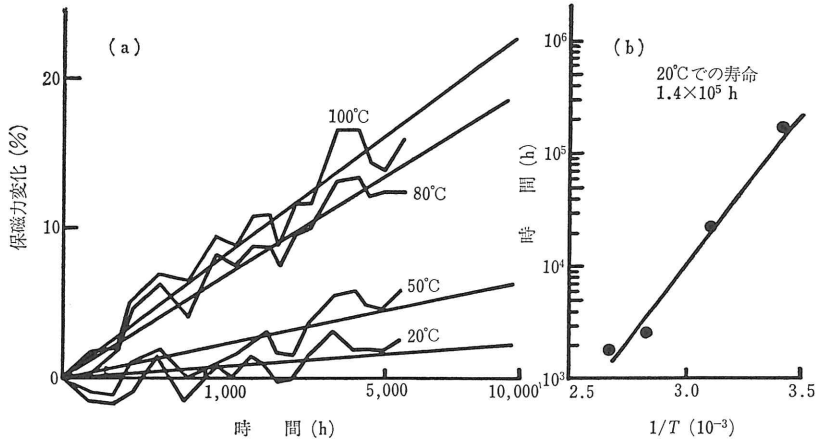


図 8 加速テストによる寿命予測
試料の製膜直後の保磁力：1.8 kOe

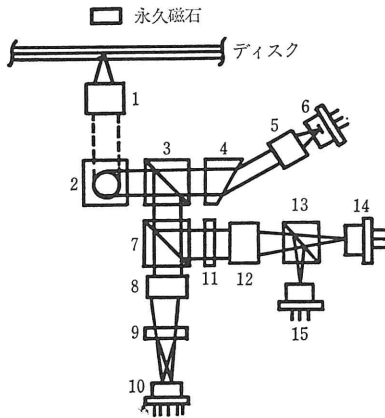


図 9 光磁気用光学ヘッド

- 1: 対物レンズ, 2: ミラー, 3: ビームスプリッター,
- 4: 整形プリズム, 5: コリメータレンズ, 6: 半導体レーザー,
- 7: ビームスプリッター, 8: レンズ, 9: シリンドリカルレンズ, 10: PIN フォトダイオード,
- 11: 1/2 波長板, 12: レンズ, 13: 偏光ビームスプリッター, 14, 15: アバランシェフォトダイオード.

- 1) トラックとフォーカスのサーボ方式を何にするか³⁰⁾.
 - 2) 差動光学系をとるか否か.
 - 3) 光検出器をアバランシェフォトダイオード(APD)を使うか PIN フォトダイオードを使うか.
- 等が変わるだけであるため, 図 9 を用いて概要を説明する.

まず高密度メモリとするために, 対物レンズで絞られた光のビーム径を小さくしなければならない. 絞り径は波長 (λ) とレンズの NA に依存するため, λ の短いレーザーと NA の大きいレンズを用いたほうがよい³¹⁾.

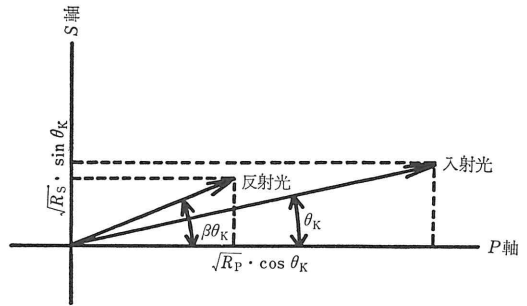


図 10 BS による θ_k 増大効果

現状では $\lambda=780\sim 830$ nm, $NA=0.5\sim 0.6$ が一般的に使用されている.

再生系において注意しなければならないのが, ビームスプリッタ (BS) である. 記録のための光量と再生のための信号光量をできるだけ多くとるため, 偏光 BS が使われることが多い. すなわち BS の反射面において P 波は透過率を大きく反射率を小さく, 反対に S 波は透過率を小さく反射率を大きくしておき, レーザー光源から P 波を入射させると BS での記録用および再生用光量の損失がともに少なくなる.

図 10 は, 再生時の BS の効果を示している. P 波と S 波のエネルギー反射率をそれぞれ R_p, R_s とし, $R_s > R_p$ とすると, 図のように反射の θ_k が $\beta\theta_k$ に増大する. この BS では反射光量も小さくなるため, 信号品質の改善にはならないが, 信号品質の劣化を減少させることができる²⁹⁾.

図 9 の偏光ビームスプリッター 13 と, 光検出器 14 と 15 で, 差動光学系を構成している. この方法は, 再生信号

の偏光特性を利用して、光量変化により生じるノイズを低減しようとする方法で、古くから検討されている³²⁾。しかし、ディスクから発生するノイズは、偏光に関係するものも含まれること、光量変化ノイズも差動光学系だけでは完全にとりきれないこと等を考えると、光学系の作りやすさや、コストを含めた検討が必要であろう。

光検出器として PIN を使用するか APD を使用するかは検出器に入る光量の多少による。光磁気の場合は、偏光を検光子で検出するため、一般的に光量が少なく APD が有利である³³⁾。

サーボ方式に関しては基本的に光メモリと異なるところがないため、ここでは省略する。

結局、光磁気メモリ用光学系は、光ディスクの光学系に比べて部品点数が多くなること、微小な偏光状態の変化を検出するためのおおの部品の高い性能を必要とすることのため高価になることが、現時点での問題点である。

7. 高密度性

光磁気ディスクメモリは、高密度メモリであることが大きな特長であるが、本稿の最後に、光磁気ディスクメモリの信号品質の現状と、高密度性について考えてみる。

光磁気ディスクの信号品質は、一般に C/N ^{*1} で表現される。 C/N は、記録ビット径が小さくなってくると低下してくるが同時に信号の読み間違い(ビットエラー)も増加する。そこで C/N を仲立として、記録密度

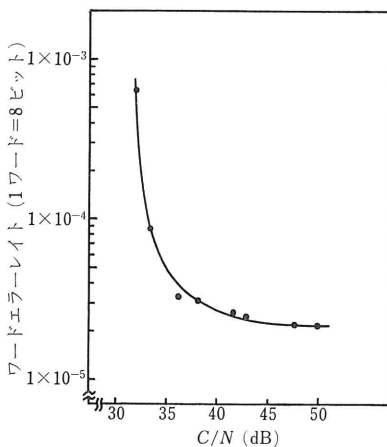


図 11 C/N (帯域 30 kHz) とエラーレート

*1 C/N (carrier to noise ratio): 記録媒体の信号品質を表わす値であり、システムでの S/N の目安となる。一般に単一周波数 (carrier signal) の再生信号をスペクトラムアナライザにより分析して得られる値である。

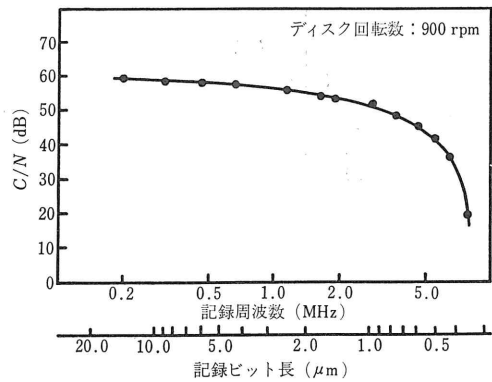


図 12 ビット長と C/N (帯域 30 kHz)

とエラーの関係調べてみる。

図 11 は直径 130 mm のディスクの半径 34 mm の位置に、900 rpm で 1.14 MHz の信号を記録し、再生しておいて、その再生信号にランダムノイズを加えていったときの C/N を横軸にとり、縦軸に 4/5 変調^{*2} であらかじめ記録された信号に同量のランダムノイズを加えたときのワードエラーレイトを示した。 C/N が 40 dB 以上であれば、エラーはほとんど一定になる。このエラーは、ディスクに固定した傷とかごみとかの影響で生じたものである。

若干の安全を見積もってデジタルメモリとして C/N 45 dB 以上が必要だと考えて、現状では、どの程度の高密度性が得られるかは、図 12 より類推できる。この図は筆者らの実験例である。直径 130 mm のガラスディスクに 1.6 μm ピッチ、0.8 μm 幅、深さ 0.07 μm のガイドトラックをらせん状に設け、AlN, GdTbFe, AlN, Al の 4 層膜を積層した光磁気ディスクに図 9 の光学ヘッドを用い、周波数を変えた信号を記録再生し、 C/N を測定した図である。横軸は、周波数と同時に記録ビット長を記しているが、5 MHz、0.5 μm のビット長で C/N 45 dB が得られている。トラックピッチが、1.6 μm であるので 0.6 μm のビット長まで記録密度を上げられると考えると、 1×10^8 ビット/cm² の高密度メモリとなる。周波数の高いところで C/N が劣化しているのは、主として再生ビーム径に比してビット径が小さくなったため、ビット信号間の分解能が悪くなるためである。したがって、光磁気ディスクメモリの高密度性の限界は、光ヘッドのビーム径によって決まっていることがわかる。

*2 4/5 変調: データビットの 4 ビットを 5 ビットのパターンに変換し記録周波数を制限して記録する方法。

8. おわりに

光磁気ディスクメモリの概要と現状を紹介した。

要素技術の解説に留まり、各方面で発表されている記録再生特性や試作機については触れることができなかった。年々基本特性の改善が見られるが³⁴⁾、最近のものとして文献 35), 36) を参照願いたい。

現在の水準でも、デジタルメモリとして十分実用可能な領域であるため、量産技術等が確立されれば商品化は近いと思われる。今後は、信号品質をさらに改善するとともに、アクセス時間を短くしたり、情報の重ね書きができる装置を検討したりして、応用の範囲を広げる努力が必要である。

文 献

- 1) 桜井良文編：光マイクロ波磁気工学 (丸善, 1976) p. 229.
- 2) D. Chen and R. L. Aagard: MnBi Films: High-temperature phase properties and Curie-point writing characteristics. *J. Appl. Phys.*, **41** (1970) 2530.
- 3) D. Chen, J. F. Ready and E. Bernal G.: MnBi thin films: Physical properties and memory applications. *J. Appl. Phys.*, **39** (1968) 3916.
- 4) K. Chida, B. Tsujiyama, A. Katsui and K. Egashira: Magneto-optical memory experiments on a rotating Mn-Cu-Bi disk medium. *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-13** (1977) 1982.
- 5) P. Chaudhari, J. J. Cuomo and R. J. Gambino: Amorphous metallic films for magneto-optic applications. *Appl. Phys. Lett.*, **22** (1973) 337.
- 6) N. Imamura, Y. Mimura and T. Kobayashi: Magnetic writing on co-evaporated Tb-Fe alloy films. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **15** (1976) 179.
- 7) 今村修武: アモルファス (Gd, Tb, Dy)-Fe 薄膜の磁気的磁気光学的性質. 電子通信学会技術研究報告, CPM-80-44 (1980) p. 31.
- 8) 山田 隆, 白石由人, 尾西康次, 桜井良文: アモルファス Gd-Tb-Fe-Co 薄膜の光磁気効果, 第 7 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1983) p. 225.
- 9) 榎井昇一, 小林 正, 綱島 滋, 内山 晋: GdFe 系多元合金薄膜の磁気光学特性, 第 7 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1983) p. 228.
- 10) 綱島 滋, 山内邦義, 小林 正, 内山 晋: Gd-Fe-Co 系アモルファス蒸着膜の磁気光学効果. 第 5 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1981) p. 146.
- 11) 新原敏夫, 高山新司, 金子克弘, 杉田 植: Tb-Co, Dy-Co 非晶質薄膜の磁気特性および磁気光学特性. 第 7 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1983) p. 214.
- 12) 桜井良文: 稀土類 - 鉄族非晶磁性膜とその応用. 電子通信学会技術研究報告, CPM 76-9 (1976) p. 1.
- 13) D. Chen, G. N. Otto and F. M. Schmit: MnBi films for magneto-optic recording. *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-9** (1973) 66.
- 14) R. L. Aagard, F. M. Schmit, T. S. Liu and D. Chen: Observations of repeated Curie-point writing effects on MnBi films. *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-9** (1973) 463.
- 15) 三橋慶喜: 光ディスク, 精密機械, **50** (1984) 1.
- 16) P. Hansen and M. Urner-Wille: Magnetic and magneto-optic properties of amorphous GdFeBi-films. *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) 7471.
- 17) 齋木幸治, 尾西康次, 桜井良文: (Gd-Co)-Bi, (Gd-Fe)-Bi 薄膜の磁気特性. 第 6 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1982) p. 10.
- 18) 横山侑子, 田中敏雄, 塚原園子: 非晶質 Tb-Fe・磁性ガーネット複合膜の光熱磁気記録特性. 第 7 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1983) p. 231.
- 19) 納土 章, 小林 正, 綱島 滋, 内山 晋: アモルファス希土類 - 鉄交換結合二層膜の光熱磁気記録消去特性. 第 5 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1981) p. 5.
- 20) 赤坂秀機: 非晶質希土類 - 遷移金属合金 2 層膜光磁気記録媒体. 機能材料, **10** (1984) 24.
- 21) K. Ohta, A. Takahashi, T. Deguchi, T. Hyuga, S. Kobayashi and H. Yamaoka: Magneto-optical disk with reflecting layers. *Proc. SPIE*, **382** (1983) 252.
- 22) 高橋 明, 太田賢司, 山岡秀嘉: 反射膜によるカー効果の増大, 第 42 回応用物理学学会学術講演予稿集 (1981) p. 125.
- 23) 高橋 明, 片山博之, 太田賢司, 山岡秀嘉: 反射膜構造によるカー効果の増大. 第 6 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1982) p. 184.
- 24) 小林政信, 浅野睦己, 川村和民, 大野清伍: Tb-(Fe, Co, Ni) スパッタ膜の光磁気特性および耐食性. 第 7 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1983) p. 222.
- 25) 小林政信, 浅野睦己, 川村和民, 大野清伍: RE-TM 膜の耐食性に及ぼす第 3 元素添加効果. 第 8 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1984) p. 125.
- 26) K. Aratani, T. Kobayashi, S. Tsunashima and S. Uchiyama: 第 8 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1984) p. 126.
- 27) 太田賢司, 広兼順司, 片山博之, 山岡秀嘉: 光磁気記録媒体の信頼性向上の検討. 日本応用磁気学会誌, **8** (1984) 93.
- 28) 太田賢司: 光磁気ディスクの信頼性. 日本応用磁気学会誌, **8** (1984) 361.
- 29) 出口敏久, 奥田 徹, 日向導夫, 太田賢司, 小林省三, 山岡秀嘉: ファイルメモリ用光磁気ディスク装置. 電子通信学会技術研究報告, CPM 83-53, (1983) p. 13.
- 30) 石井泰弘, 虎沢研示: 光磁気ディスク用光学ヘッド, 日本応用磁気学会誌, **8** (1984) 350.
- 31) J. D. Zook and T. C. Lee: Geometrical interpretation of Gaussian beam optics. *Appl. Opt.*, **11** (1972) 2140.
- 32) R. P. Hunt: Magneto-optics, lasers, and memory systems. *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-5** (1969) 700.
- 33) 野村龍男: 光磁気記録. 日本応用磁気学会第 18 回研究会資料 (1981) p. 79.
- 34) 今村修武: 光磁気ディスクメモリの現状. 日本応用磁気学会誌, **8** (1984) 345.
- 35) 第 8 回日本応用磁気学会学術講演概要集 (1984).
- 36) *Appl. Opt.*, **23**, No. 22 (1984).