は非磁性の Co_2P 相が析出して、おのおのの粒子を単磁区粒子として振舞わせていると考えられている。真空蒸着法の場合には、斜蒸着によって生ずる成長粒子の異方性から来る保磁力を利用している。

この分野の中で、新しい材料の可能性を考えてみると、前にも述べた R-Co 合金の、特に Sm などの軽希土類との金属間化合物の薄膜が考えられる。まだ、この種の薄膜を磁気記録媒体として利用した例を聞いていないが、この種の材料では非晶質 Gd-Co 合金膜のように H_c が数 Oe のものから結晶性の膜で数万 Oe まで分布している¹⁴⁾、材料と製作条件などを選ぶことにより、かなり任意の大きさの H_c が作り出せる。また、 $4\pi M_s$ も、キュリー温度もいろいろに変化できるので、新たな応用面も拓かれてくると思われる。ただ、この種の材料では前にも述べたように化学的不安定性の問題があるだろう。

4. む す び

以上、磁性体による画像メモリーの将来ということにからめて、現状と将来の概観をして来たつもりであるが、話は現状紹介の域を出ず、しかも、もっぱら材料のことに終始してしまったように思える。この点、充分にその任を果せなかったことはおわびしたい。ただ私ども

は、磁気バブルにしても磁気記録材料にしても、現状では主に材料問題がその根本のように感じている。なお、参考文献は古いものは避け解説と最近のものだけをあげるにとどめた。

(参 考 文 献)

- 1) 磁気バブル関係の解説として 2, 3 紹介すると、
小林寛：磁気バブルドメイン技術（工業調査会）
飯田修一：電子材料, 3 (1973) 81
- 2) F. A. de Jonge, J. A. L. Potgiesser, D. L. A. Tjaden and U. Enz: Digest of Intermag '73 (1973) p. 5-2
- 3) P. Chaudhari, J. J. Chomo and R. J. Gambino: IBM. J. Res. Dev., 17 (1973) 66; Appl. Phys. Lett., 22 (1973) 337
- 4) A. H. Bobeck, R. F. Fischer and J. L. Smith: AIP Conf. Proc., No. 5 (1971) 45
- 5) G. A. Keig: 8th M-3 Conf. (1972) 2C-1
- 6) J. C. Slonczewski, A. P. Malozemoff: M-3 Conf. (1972) 8D-1
- 7) R. Wolfe, J. C. North and Y. P. Lai: 18th M-3 Conf. (1972) 3D-8
- 8) K. J. Strnat: Cobalt, 36 (1967) 133
- 9) 浅沼満：固体物理, 18 (1973) 3
- 10) Y. Yada, S. Miyamoto and H. Kawagoe: Digest of Intermag '73 (1973) 5-6
- 11) R. J. Deffeyers, C. E. Johnson and J. H. Judy: IEEE Trans., MAG-8 (1972) 465
- 12) J. B. Y. Tsui, H. F. Mildrum, K. J. Strnat and C. W. Shanley: M-3 Conf. (1972) 4E-5
- 13) D. L. Martin and M. G. Benz: IEEE Trans., MAG-8 (1972) 562
- 14) H. C. Theuerer, E. A. Nesbitt and D. D. Bacon: J. A.P., 40 (1969) 2994
- 15) M. Kawasaki and S. Higuchi: IEEE Trans., MAG-8 (1972) 430

特 集 画像メモリー

6-4 光 磁 気 メ モ リ ー

日本電信電話公社 茨城電気通信研究所 加 藤 嘉 則

1. ま え が き

画像技術にレーザー光がいろいろ利用できることはよく知られているが、実際には、たいていの場合むずかしい問題があって、すぐに応用できるとは限らない。とくに録画の分野では高密度記録が要求されるので、きわめて細いビームの得られるレーザー光は魅力的である。しかし、この細いビームを使って繰り返し記録したり再生する媒体となると非常に限定されてしまっており、いまだに決定的なものは得られていないのが現状である。

ここに述べる MnBi 薄膜を代表した光磁気メモリーの技術は、その意味でまだまだ将来の技術であり、多くの問題が解決されなければならない。しかし光磁気メモリーは、高密度のうえ、磁性体の磁化反転を利用しているので、書きかえ可能という長所を持っている。したがって、レーザー、光変調器、および光偏向器などの、いわゆる光エレクトロニクス部品の性能向上とあいまって、有望な技術と考えられている。

2. 光磁気メモリーの原理

光磁気メモリーについては、いままでに数多くの提案があるが、原理的には、書込みにレーザー光の熱作用と磁界の効果を組合せて利用し、読出しには光磁気効果

"6-4 Magneto-Optic Memories" by Yoshinori Kato (Ibaraki Electrical Communication Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Ibaraki)

図1 キュリー点書込みと消去の原理

(ファラデー回転またはカー回転) などを利用するものである。したがって、書込みについていえば、“光磁気”というよりもむしろ“熱磁気”というべきかも知れない。

熱磁気書込みは、抗磁力が温度によって変化する磁性薄膜材料を必要とするが、その原理はいろいろのものが注目されている。次にその代表的な例をあげる。

強磁性性が自発磁化を失い常磁性状態へ磁気転移する温度はキュリー点と呼ばれている。このような磁性体の薄膜の磁化をあらかじめ一方に飽和させておき、レーザー光で局所的にキュリー点以上まで加熱すると、その場所だけ磁性媒体の抗磁力が減少するから、外部から比較的弱い磁界を、はじめと逆の方向に加えてやれば磁化の反転が起こる。この関係を図1に示す。条件が適当であれば、磁化の反転はとくに外部磁界を加えなくても、周囲の磁化が作る反磁界によっても起こる。

一例として、MnBi 薄膜については、真空蒸着法で作製すると膜面に垂直方向に磁化のよく揃ったものが得られる。また MnBi 薄膜の磁区はきわめて小さくすることができると、記憶させるビットの大きさ、つまり記憶密度は、むしろレーザー光の収束限界 ($\lesssim 1 \mu\text{m}\phi$) できまり、 10^8 bit/cm^2 という高密度が実現可能とされている。

磁化の反転温度をもつフェリ磁性体でも類似のことが考えられる。その例はガドリニウム・鉄ガーネット (GdIG) であるが、その抗磁力は図2に示すように、 14°C 付近で急激に大きくなる¹⁾。

この温度はコンペンセーション温度と呼ばれ、フェリ磁性の原因となっている、互いに反対方向を向いた鉄およびガドリニウムのそれぞれの格子に起因する磁化が、ちょうど釣合う温度である。

この場合の書込み原理は、たとえば GdIG の結晶薄膜をまずコンペンセーション温度に保っておき、レーザー光を収束させて局所的に 3°C 程度加熱してやると、抗磁力が著しく低下するから、外部磁界を加えることによってその場所の磁化だけを容易に反転することができる。

図2 GdIG の抗磁力の温度変化¹⁾

GdIG は反転温度が常温に近いので、書込みに要するレーザーのパワーは小さくてすみ、また酸化物であるため安定であるなどの利点がある。

光磁気メモリー用材料としては、このほか結晶磁気異方性の特異な温度変化を利用した CoP の薄膜による例などがある。

読出しに光磁気効果を利用することは、光ビームを走査するので磁気ヘッドなどの方法にくらべると一般に高速性、高分解能が期待できるだけでなく、磁化量そのものに比例した出力が得られるという大きな特長がある。

磁性体に入射した直線偏光が、磁性体を透過したとき、あるいは磁性体表面から反射した場合にどのようなかは、物質中での Maxwell 方程式を解けば得られるが、一例として MnBi のように磁化が膜面に垂直な1軸性強磁性体を考えると、透過光も反射光も楕円偏光になる。透過光 (Faraday 回転) の場合には、物質中を通過した距離に比例して楕円偏光の主軸が回転する。この場合、磁化方向が逆だと逆方向に回転するので、検光子を用いると磁化の方向が区別できる。反射光 (Kerr 回転) の場合にも同様に主軸は回転するが、その大きさは入射面と磁化の方向との関係で異なる。磁化が試料表面に垂直な場合に最も大きい効果が期待できる。

書込んだ情報を壊さないために、読取りに用いるレーザー光は、むしろ書込みの場合に問題となったキュリー温度に達しないことが望ましいので、比較的弱いものを使用する。またすでに書込んであるビットを消去するには、書込みの場合とまったく同じ原理 (図1) を用いるが、ただ外部磁界だけは書込みの場合と逆方向で、反磁界に打勝って磁化が反転できるような充分強いものが必要である。

6. 画像記録に応用される新現象と将来

コンポーザー(光バルブのマトリックス)で反射した回折光と参照光とで MnBi 薄膜を照射し、干渉させてキュリー点書き込みを行なう。概念的な装置構成の例を図4に示す²⁾。この図で LATRIX というのは、ページコンポーザーと光検出マトリックスが複合化された部品で、図4の構成では、LATRIX の前に置かれた検光子と偏光スイッチの組合せでその機能が選択されるようになっている。

4. 光磁気メモリーの現状

原理の説明から明らかなように、光磁気メモリーでは、適切な記憶媒体が不可欠である。記憶媒体に期待される条件をあげると、まず書き込みについては、高いビット密度が実現できることと、書き込みの効率が良いこと、できれば書き込み温度が常温に近くて、弱いレーザー光で書けることである。

高密度化の点では、光学系の問題を別とすれば、安定で最も小さい磁区の大きさが記憶媒体の分解能の限界を与えられとされる。MnBi の場合、最小磁区の大きさは膜厚や粒径に依存するが、ビット径 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ で書込むには $700 \text{ \AA}$ 程度の厚みの膜が用いられている。代表的な光磁気メモリー用の材料について、書き込みの特性を表1³⁾に比較してある。

次に、読出しにファラデー回転を利用する場合について媒体材料の性質を考える。いま磁性体膜面に垂直ないずれか方向の磁化状態を消光状態とすると、検光子をセットすると、逆方向に磁化した場所を透過する光の強さ ΔI は、

$$\Delta I = I_0 e^{-\alpha t} \sin^2(2Ft) \quad (1)$$

となる。ただし、 I_0 は磁性体薄膜への入射光の強さ、 α は磁性体の光吸収係数、 t は膜厚、また F は単位長当りのファラデー回転角である。 $t = 2/\alpha$ のとき ΔI は最

表1 代表的な光磁気メモリー材料の書き込み特性³⁾

材 料	動作温度 (°C)	書き込み磁界 (Oe)	書き込み原理	レーザーパワー
MnBi	~180, 350		キュリー点	~10-20mW (出力) He-Ne
Hexagonal Co(P)	室 温	100~300	結晶磁気異 方性	~100mW (出力) Ar
GdIG	~0	<100	コンベン ション点	~10-20mW (出力) Ar
EuO	20K	~50	キュリー点	~100mW (出力) GaAs
CoP: CoNiFe (層構造)	{ 室 温 150	~300 <100	キュリー点	3W (入力) Ar

図3 光磁気メモリー (ビットバイビット)

図4 磁気ホログラフィー概念図²⁾

3. 光磁気メモリーの構成

光磁気メモリーを大別すると2つの方法がある。ひとつはビットバイビットと呼ばれるもので、ビットの1つ1つを書込んだり読出す。レーザー光を直径 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ にしぼって磁性体薄膜面の所定の位置に正確に当てるためには、きわめて精密なアクセスが必要であるが、理想としては、図3(a)のような系が考えられる。この場合磁性媒体は固定しておき、光ビームを2次元的に偏光させる方法が、高密度、高速性の点から望ましい。機械的な可動部分が入ると、図3(b)のような系も考えられる。

もうひとつの方法は、磁気ホログラフィーと呼ばれるものである。この方法では、ビット情報を含んだページ

大値をとり、

$$\Delta I_{\max} = I_0 e^{-2} \sin^2 \left\{ 2 \left(\frac{2F}{\alpha} \right) \right\} \quad (2)$$

となる。膜厚が充分薄いときには、読出し信号が $(2F/\alpha)$

表 2 代表的な光磁気メモリー材料の特性⁴⁾

材 料	α (cm ⁻¹)	F_{eff} (deg/cm)	λ (Å)	T_c (K)
MnBi	4.7×10^5	9.4×10^5	6300	630
MnAlGe	1×10^6	1×10^5	5500	518
EuO*	9.7×10^4	3.6×10^5	6000	69
GdIG	9×10^2	-1×10^3	6000	564 (Néel pt.)

* 光学特性は 5 K で測定。

図 5 MnBi 薄膜の光磁気特性⁵⁾

図 6 ディスク型光磁気メモリー実験装置⁶⁾

α)² に比例することになるので、普通 $(2F/\alpha)$ の値をその記憶媒体の figure of merit として用いている。

表 2⁴⁾ に代表的な記憶媒体のファラデー回転による読出し特性を示す。また一例として、MnBi の figure of merit が光の波長によって変化する様子を図 5⁵⁾ に示した。

MnBi は、先にも述べたように、書きかえ可能な磁気ホログラフィーの媒体として用いることができるが、回折効率がかなり小さいなどの問題があって実用的ではない⁵⁾。ここではビットバイビット法による光磁気メモリーを中心に説明する。

図 6 は、MnBi 薄膜を用いた光磁気メモリーの基本的な特性を調べるために作製した実験装置のブロック図である⁶⁾。MnBi 薄膜は、硼硅酸クラウンガラスを用いた直径 139 mm、厚さ 20 mm のディスク基板上に真空蒸着で作ってある。薄膜の厚さは約 750 Å で、ファラデー回転角は、波長 4880 Å の光に対して $\pm 4.5^\circ$ である。この薄膜上へ、焦点深度 5 μm の集光レンズで直径 1 ~ 2 μm に光をしばって書込むので、ディスクの回転による面ぶれやトラックのずれはどうしても 1 μm 以下におさえる必要がある。そこでディスクの駆動には、外周をジャーナルおよび対向スラスト空気軸受で支え、空中に浮上した状態のままモーターで回転させる方法がとられている。

光偏向器には、ピエゾ鏡型のものが使用されているが、偏向角度が充分大きくないので、この実験装置では、広範囲にわたるトラック選択を集光レンズ系全体を移動させることによって行なった。したがって原理的には、完全なランダムアクセスが可能である。クロック系は、特別なトラック上にあらかじめ記録されているクロック信号を読出して、全体の動作の時間的な基準を作るものである。読出しはすべてファラデー効果を利用している。

図 7 に、動作特性の一例として、書込みパワーを 100 mW としたときの媒体速度と書込みパルスの幅との関係を示した。媒体速度は、トラックの位置とディスクの回転数できまる。また書込みのレーザーパワーは、集光レンズ直前で測定した値を採用しており、媒体に実際に入射するのはその 60% である。図に ○、× および △ で書込みの状態を示してあるが、容易にわかるように、パルス幅があまり小さくても、また媒体速度が速すぎても書込みはできなくなる。逆にあまり長時間同じ場所が加熱され

図7 書き込みパルス幅と媒体速度の関係 ($P=100\text{mW}$)

ると、焼きぬけができてしまう。これらの結果は、媒体の温度上昇特性から説明できる⁷⁾。

いま、静止媒体での書き込みおよび損傷の閾値エネルギーをそれぞれ E_w および E_d とすると、移動媒体に対する書き込み条件は、

$$\frac{E_w}{\pi w^2} \leq \frac{P}{\pi w v} \operatorname{erf}\left(\frac{vt}{2w}\right) \leq \frac{E_d}{\pi w^2} \quad (3)$$

で与えられる。 w は集光したビームの半径、 P は書き込みのレーザーパワー、 t はパルス幅である。 E_w および E_d の値は図7から、媒体速度 $v \rightarrow 0$ の外挿値として求めることができ、 $E_w = 24 \text{ nJ}$ および $E_d = 30 \text{ nJ}$ となる。 $w = 1 \mu\text{m}$ とすると、(3) 式は、

$$1.9 \left(\frac{\text{nJ}}{\mu\text{m}^2} \right) \leq \frac{P}{\pi w v} \operatorname{erf}\left(\frac{vt}{2w}\right) \leq 2.4 \left(\frac{\text{nJ}}{\mu\text{m}^2} \right) \quad (4)$$

となり、この計算結果は図7に破線で示してある。実線で示した実験値との差は、おそらく単純なモデルで計算を行なったためと思われる。集光レンズの損失と、実際に書き込んだビットの直径が $2 \mu\text{m}$ であることを考慮すると、結局この MnBi 薄膜への書き込みに適したエネルギー密度は、 $4.6 \sim 5.8 \text{ nJ}/\mu\text{m}^2$ ということになる。このように書き込みのマージンが狭いことは、レーザーや変調器などの光学部品の安定度から考えあわせると重要な問題である。これについては後で触れる。

図6に示した実験装置で得られた書き込み結果の一例をあげると、クロック周波数 1 MHz 、レーザーパルス幅 400 ns 、ディスク回転数 $1,000 \text{ rpm}$ 、書き込みパワー 70 mW の条件で、ビット径 $2 \mu\text{m}$ 、ビット密度 220 bit/mm 、トラック密度 170 トラック/mm などの値が得られた。このビット密度は、ディスク1枚について約 2.5 億 bit

図8 複眼レンズによるアクセス法⁸⁾

となり、現用の電子計算機用磁気ディスクの密度と比較して $10 \sim 100$ 倍大きい。この差は主としてトラック密度の差にもとづくものである。

読出しは、 5 MHz の速度まで充分な S/N の信号が得られている。しかしこのような高密度に見合う高精度のトラックアクセス法の問題は残されている。これについては、次のような複眼レンズを用いた方法の提案⁸⁾がある。

この方法は、図6の書き込み用集光レンズに図8のような小型の複眼レンズのアレイを用いるものである。レンズに垂直に入射した光線は必ず焦点を通ることに着目して、図のように複眼レンズアレイの方向を、トラックの方向とわずかな角度 θ だけ傾けて配置する。 θ を適当に選ぶと、各レンズの中心がそれぞれ異なった1本のトラック上に来るようにできるが、そのとき次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} \frac{w}{mD} < \theta < \tan^{-1} \frac{1}{m} \\ 2w < \Delta d \leq \frac{D}{m} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 w は書き込むビットの直径、 Δd はトラック間隔、 D および m はそれぞれ複眼レンズの直径およびアレイの一辺方向のレンズの個数である。簡単のためここでは正方形のアレイを仮定した。このような条件のもとでは、ただアクセスしたいトラックを受持つ複眼レンズの直径内に光ビームが入射するよう偏光させれば充分となり、密集したトラックを直接ねらって偏向させる場合にくらべるとはるかに制約が緩和される。一例として、直径 1 mm 、焦点距離 3 mm 、 20×20 個のセルフオック複眼レンズアレイを用いた実験を行なった。この場合は全体で 400 本のトラックまでアクセスができることにな

る。

以上で説明した装置では、読出しにファラデー効果を用いているが、カー効果を用いたものも試みられている⁵⁾。

5. 光磁気メモリーの問題点

光磁気メモリーについて現在最大の関心事といえば、やはりすぐれた材料を開発する問題であろう。これはビットバイビット方式でもホログラフィー方式でも同様である。最近、表1に掲げた記憶媒体以外にも、MnAlGeやMnGaGe⁹⁾などについての研究も発表されている。それぞれに問題があるが、ここでは紙数の関係もあって、とくにMnBi薄膜に関係した問題点と現状について簡単に触れてみたい。

キュリー点を下げる問題 MnBiには結晶学上2つの相があり、先に説明した低温相のMnBiを360℃以上から急冷すると高温相と呼ぶ別の相に転移する。これはキュリー点が180℃であるから、書き込み用レーザーパワーが少なくすむが、光磁気メモリー用媒体としての特性は、低温相にくらべて多少悪くなる¹⁰⁾。また、このままではあまり安定でないで、たとえばMn原子をTiで一部置換して安定化をはかる研究がなされている¹¹⁾。

劣化防止 MnBiは水蒸気と酸素によって劣化しやすいから、SiOやSiO₂などを表面に被覆して保護する必要がある¹²⁾。

その他、均一な薄膜の作成についてはすでに数多くの研究がなされていて^{12)~14)}、ビット落ちなどの問題と関係が深いので重要である。

光磁気メモリーとしての一般的な問題には、とくにビットバイビット方式について、精密な光アクセス法の問題があげられよう。これは同時に信頼性のある媒体および“ごみ”などによるビット落ちの防止法が必要なことも意味している。磁気ホログラフィー方式では、これらの点での制約はゆるくなるが、高感度の記憶媒体と高性能のLATRIXなどの開発が必要である。他方では、安定なレーザー光変調器、高速で偏向角の大きい光偏向

器など、光エレクトロニクス部品の高性能化も必要であろう。

6. む す び

光磁気メモリーの研究が開始されてから数年経過しているが、とくに最近の磁気ディスクを中心とした磁気メモリー技術のめざましい進展を考えると、光磁気メモリーの将来も多難と思われる。しかし前の章で扱ったような問題点を一步一步解決して、着実に前進が続けられており、ユニークな新技術として陽の目を見るのもそれほど遠くないと思われる。

〔参 考 文 献〕

- 1) J. T. Chang, J. F. Dillon, Jr. and U. F. Gianola: Magnetooptical Variable Memory Base upon the Properties of a Transparent Ferrimagnetic Garnet at Its Compensation Temperature, *J. Appl. Phys.*, **36**, 3 (1965) 1110-1111
- 2) W. C. Stewart and L. S. Cosentino: Optics for a Read-Write Holographic Memory, *Appl. Opt.*, **9**, 10 (1970) 2271-2275
- 3) R. E. Matick: Review of Current Proposed Technologies for Mass Storage Systems, *Proc. IEEE*, **60**, 3 (1972) 266-289
- 4) R. W. Cohen and R. S. Mezrich: Materials for Magneto-Optic Memories, *RCA Rev.*, **33**, Mar. (1972) 54-70
- 5) R. A. Aagard, T. C. Lee and D. Chen: Advanced Optical Storage Techniques for Computers, *Appl. Opt.*, **11**, 10 (1972) 2133-2139
- 6) B. Tsujiyama, S. Yoshii and K. Nishiguchi: Magneto-optic Disk Utilizing MnBi Thin Films, *IEEE Trans.*, **MAG-8**, 3 (1972) 603-605
- 7) 辻山文治郎: MnBiによるディスク形光メモリの書き込みについての考察, *信学論誌*, **55-C**, 3 (1972) 184-186
- 8) 千田和恵, 辻山文治郎: 光磁気ディスクアクセス法, 昭48年度信学全大, 216
- 9) E. Sawatzky and G. Bryan Street: Magnetic and Magneto-optical Properties of Sputtered MnGaGe Films, Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 6G-3 (1972)
- 10) D. Chen and R. L. Aagard: MnBi Films: High Temperature Phase Properties and Curie-Point Writing Characteristics, *J. Appl. Phys.*, **41**, 6 (1970) 2530-2534
- 11) W. K. Unger, E. Wolfgang, H. Harms and H. Haudek: Structural, Magnetic and Magneto-Optic Properties of Ti-Substituted MnBi Films, *J. Appl. Phys.*, **43**, 6 (1972) 2875-2880
- 12) D. Chen: Preparation and Stability of MnBi Thin Films, *J. Appl. Phys.*, **42**, 9 (1971) 3625-3628
- 13) B. Tsujiyama, S. Yoshii and K. Nishiguchi: Magneto-optic Disk Utilizing MnBi Thin Films, *Intermag. Conf.* (1972) 43.2
- 14) M. Tanaka, T. Ito and Y. Nishimura: Diffraction Efficiency of Magnetic Hologram, *Intermag. Conf.* (1972) 34.1