

書換型相変化光ディスクの多層化限界

西内 健一, 西原 孝史, 山田 昇

松下電器産業(株)メディア制御システム開発センター(〒570-8501 大阪府守口市八雲中町3-1-1)

Limitations for the Number of Layers of
Multi-Layer Rewritable Phase-Change Optical Disks

Kenichi NISHIUCHI, Takashi NISHIHARA, and Noboru YAMADA

Storage Media Systems Development Center, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

3-1-1 Yagumo-nakamachi, Moriguchi, Osaka 570-8501

(Received September 3, 2003)

We carried out a feasibility study on rewritable phase-change optical disks with more than two recording layers. Dynamic recording-playing evaluations of the test disks and Tx measurements revealed the thinning limit of the examined GeSbTe memory film to be 2 nm. The disk with a 2.5-nm thick recording film showed a high transmittance of 77 % at a wavelength of 405 nm, and a CNR of 45 dB. Based on our experimental results, we conclude that at minimum, a quadruple-layer disk for blue lasers will be possible pending some improvements in the maximum output of laser diodes, the sensitivity of optical detectors and the crystallization speed of memory films.

Key Word: Multi-layer, Phase-change, GeSbTe, Rewritable, Blue laser

1. はじめに

DVDレコーダの登場により、書換え型光ディスクが画像記録用の媒体として一般家庭に普及しはじめている。今後はハイビジョンの記録や家庭用サーバ等の用途を見て、より大きな容量をもつ光ディスクが必要と思われる。光ディスクを大容量化するための開発には大きく分けると2つの方向がある。1つは、光源の短波長化、対物レンズの高NA化¹⁾、超解像記録、多値記録等により、平面内での記録密度を高める方法。そして、もう1つが、記録層を縦方向に積み重ねる多層記録である。多層記録は、平面内での記録密度向上の方法と組み合わせることができるので、大容量化には極めて有利な方式だと考えられる。

多層記録技術は、既に再生専用のDVDメディアとして実用化されていて、実際、世の中に出ているDVD-Movie(映画用DVD)で、大作とよばれるもののほとんどは2層DVDである。2層DVDの製造には、記録膜を形成した2枚の基板を数10 μ m厚の紫外線硬化樹脂層で接着するという工法²⁾を用いるが、この方法はそのまま記録型光ディスクにも応用することができる。われわれは、これまで赤色レーザー用メディアとして、TeOPd薄膜を記録層とする追記型2層メディア³⁾、GeSbTe薄膜を記録層とする書換え型2層メディアを開発し報告してきた⁴⁾。また、青色レーザーを用いても同様な2層化が可能なることを確かめてきて

いる⁵⁾。

また、2層よりもさらに多層化する方法も既に試みている。ここでは、基板の上に第1の記録層を形成した後、記録層の上に樹脂スタンパーを用いて溝トラックを転写して形成し、その上に第2の記録層、第2の溝トラック、第3の記録層...というように順に積み上げていくことにより、原理的には何層でも積み重ねることのできる方法⁶⁾を開発した。この方法により、追記型では4層ディスクでの記録を確認している⁷⁾。では、書換え型はどうかというと、追記型よりも技術的にははるかに難しい点が多く、いまのところ2層ディスクまでしか報告がない^{8,9)}。

本稿では、この書換え型の多層ディスクについて、その必要とされる基本的性能を簡単に解説した後、多層書換え型光ディスクの可能性を実際に検討した結果について述べる。ここでは、多層化における課題のうち、もっとも本質的に重要な課題と考えられる相変化記録層の厚さ限界を調べ、得られた超薄膜相変化記録層を用いた光ディスクを設計・試作し性能を評価する。さらに、その評価結果を基に4層化あるいはそれ以上の多層ディスクの可能性を議論する。

2. 相変化材料による多層記録

2.1 多層化に要求される基本性能

Fig. 1に多層ディスク(n 層)の構成を模式的に示す。多層

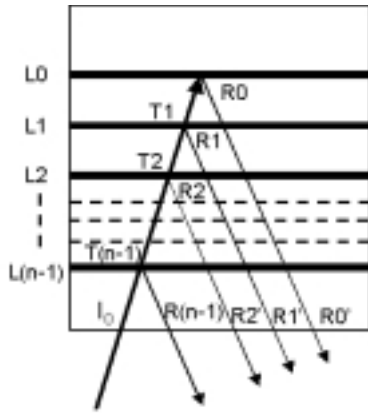


Fig. 1 Structure of a multi-layer disk.

ディスクの技術的課題には様々なものがあるが、結局のところは次の2つに集約される。1つは、多層間の光学的なクロストークの課題、もう一つは複数の光吸収性の材料層を通過することによる光強度の減衰の課題である。クロストークの課題は、例えば一番奥にある情報層L0の信号を記録再生する場合に、手前側に位置するL1~L(n-1)の記録状態の影響を受けて記録マークが歪んだり、再生信号にノイズが乗ったりすることである。この課題については、本研究の目的とはずれるので各情報層間の距離(=中間層の厚さ)を充分大きくすることで抑制できるということを述べるにとどめる。

一方、光強度の減衰の課題は、半透明層L1~L(n-1)を透過する際の減衰であり、特に一番奥のL0層に記録する場合、光入射側すべての情報層の透過率 $T_1, T_2, \dots, T(n-1)$ の積で減衰した光を用いて行わなければならないので、もし各層の透過率が充分大きくなければきわめて大きな出力のレーザー光源が必要となる。再生時には、光入射側の情報層を2回透過するため、透過率の2乗で減衰した光となる。これを補償するために、感度の高い光検出器が必要となる。

ここで光強度の減衰の課題に対し、情報層に要求される基本性能について述べる。

1)高い透過率を持つ相変化記録膜を実現すること。これには、記録膜の膜厚を薄くすることが必須であるが、記録膜を薄くすると、結晶化が難しくなる傾向があり、結晶化と両立できる膜厚限界の見極めが必要である。

2)充分に大きい反射光の信号レベルを確保すること。奥の情報層の反射光は、各情報層で減衰した後でも十分な品質を備えるように、さらに信号復調の観点からは、検出器に到達する光量 $R_0', R_1', \dots, R(n-1)$ がほぼ等しくなるように、光源側の層での減衰を考慮した設計が必要である。

3)情報層が高い記録感度を有すること。

情報層が、高い透過率を確保したままで実用的なレーザーパワーで記録可能なことである。これには、各情報層の光吸収の配分を考慮した設計が必要である。

4)記録の前後で透過率が変化しないこと。

半透明情報層が未記録部と、記録部とで透過率が異な

ると、奥の情報層に到達する光量に変化し、記録エラーの原因となる。特に情報層が増大した場合、例えば4層の場合は、L0層への記録時の到達光量は、3層(L1, L2, L3)の透過率の積となるため、この記録/未記録部の透過率差の影響は、さらに顕著となる。また再生時には、透過率の2乗に比例して減衰するため大きな振幅差が生じるといふ課題が発生する。これを解消するには、未記録部の結晶状態と、記録マーク部のアモルファス状態との間の透過率差が小さいこと(透過率バランス構造)が必要である。

2.2 多層化に必要な透過率

多層化の層数と情報層に要求される最大透過率の関係を見積もる。多層化時の各情報層には、できるだけ低いパワーで記録可能であることと、各情報層からの再生信号の品質が同等であることが求められる。記録パワーを低くするには、入射光 I_0 に対し各層の吸収が等しく、同程度のパワーで記録可能なことである。これには、光入射方向に遠い位置の情報層ほど、吸収率と反射率を高く設定する必要がある。

ここで各情報層の配分をより簡略化するため、積層した状態で入射光 I_0 を、各情報層に均等に配分することが有効であると仮定し、各層の透過率の目標を算出した。なお、情報層間では、吸収と反射の割合を変える必要があるが、ここでは合計の値が等しくする。この場合、多層膜の光源に最も近い情報層の透過率 $T(n-1)$ が最も高くなり、記録層数を n とすると、次式で表される。

$$T(n-1) = 1 - 1/n$$

Table 1に、2層から8層までの各記録層の透過率を示す。この関係を元に情報層の達成可能な最大透過率から実現可能な積層数を見積もることができる。例えば、既報の50 GB記録に適用した2層ディスク⁹⁾のL1層の透過率は52%であり、2層記録の条件と適合している。

4層ディスクの場合は、各情報層の透過率を、L0:0%, L1:50%, L2:66.7%, L3:75%とすることで、各情報層に入射光の25%を配分することができる。なお、8層の場合はL8が87.5%の透過率を満たすことが指標となる。

3. 実験方法

3.1 記録層の薄膜化

多層化の可能性検討は、50 GB記録を実現した2層ディスク技術をベースに行い、記録材料にはGeSbTe系相変化材料を用いる。記録膜の薄膜化の限界を調べ、次に光ディスク性能を評価する。

はじめに、相変化記録膜の薄膜化限界を、結晶化温度の測定により明らかにする。ガラス基板上に、膜厚を段

Table 1 Calculated maximum transmittance of multi-layer stack number.

Number of layer n	2	3	4	6	8
Transmittance (%)	50.0	66.7	75.0	83.3	87.5

階的に変えた記録材料薄膜を成膜したサンプルを一定の昇温速度で加熱し、加熱中の透過率の変化から、薄膜の結晶化を判断する。この方法は照射した光ではなく、外部の熱により加熱を行うため、薄膜の光吸収等に依存せず、昇温による結晶化を判断することが可能である。なお、サンプル片の加熱速度は50 °C/minとした。

3.2 薄膜記録層のディスク特性

結晶化温度測定により、結晶化を確認した厚さの記録膜を用いてディスクを試作し、レーザー光による記録動作を確認する。光ディスクとしての性能を評価するために用いた薄膜構成をFig. 2に示す。トラックピッチ0.32 μ mのガイド溝を備えたポリカーボネート基板の上に、再生信号の得るためにTiO₂膜、反射層、誘電体膜、2つの界面膜、記録膜を備えた6層構造¹¹⁾とした。高NA記録に対応するために、100 μ mのカバー層を貼り合わせた構成とする。

試作したディスクの特性は、Blu-ray Disc規格¹²⁾に準ずる仕様に基づき、レーザー波長405 nm、対物レンズNA0.85の光学系を用い、線速度4.92 m/sにおいて、容量25 GB/層を想定して記録特性を評価する。記録信号には、回路ノイズの影響が少ない1-7 PP変調の最長周期8 T信号(マーク長0.6 μ m)を用いる。各膜厚に対するCNRの記録パワー依存性から、材料薄膜のアモルファス化を確認し、記録に必要なパワーを求める。次にDC光を照射することで消去動作(結晶化)を確認する。

4. 実験結果

4.1 結晶化温度の膜厚依存性

記録膜の薄膜化限界を判断するために、膜厚2~6 nmの

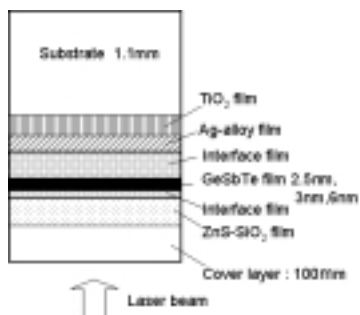


Fig. 2 Cross-sectional view of the experimental disk.

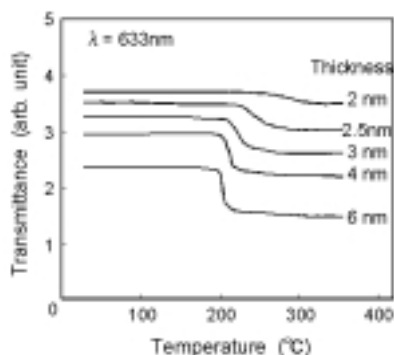


Fig. 3 Crystallization temperature of GeSbTe film.

Ge₈Sb₂Te₁₁薄膜の結晶化転移温度を測定した結果をFig. 3に示す。薄膜の温度が200 °Cを超えた条件で、透過率が急激に低下している。膜厚が6 nmから2 nmと薄くなるに従って、徐々に結晶化に要する温度が上昇すると共に透過率の変化量が小さくなるが、2 nmにおいても透過率の低下は見られる。

4.2 記録パワー特性

結晶化を確認した膜厚2.5 nm, 3 nm, 6 nmの記録膜を備えたディスクをそれぞれ試作し、レーザー光による記録特性を評価する。各ディスクの透過率は、それぞれ77.3%, 71.2%, 51.3%であった。

Fig. 4は、記録膜の膜厚に対するCNRの記録パワー依存性を示す。記録膜厚10 nm, 6 nmでは十分な飽和は見られるが、3.5 nm, 3 nmでは飽和が見られず、記録パワー不足となっている。ここで、CNRの飽和する値よりも20 dB低い値を記録開始パワーと定義すると、記録膜厚2.5 nmではピークパワー8 mWで記録が開始し、評価系の最大パワー11 mW近傍で45 dBのCNRが得られている。記録膜厚3 nmでの記録開始パワーは7 mW、記録膜6 nmでは5 mW、10 nmでは2.5 mWである。

また、膜厚2.5 nmで、記録済みのトラックに記録開始パワーの80%の連続光を照射すると振幅が低下し、消去率を測定したところ、1回照射で3 dB、10回で25 dBが得られた。膜厚3 nmでは1回で6 dB、5回で25 dBとなり、6 nm以上では1回照射で26 dB以上の消去率が得られた。また、いずれの膜厚においても、再度記録パワーの変調光を照射すると初期と同レベルの信号記録でき、消去についても同様の变化を示し、数10回の繰返しにおいても同様の变化を確認した。

5. 考察

5.1 記録膜の薄膜化限界

Fig. 3の結晶化温度測定の透過率変化からGe₈Sb₂Te₁₁材料が、膜厚2 nmまで結晶化可能であることが明らかになった。ただし、変化が他の膜厚の変化に比較して緩やかであり、結晶化速度が不足していると考えられる。この対策としては、記録層にSn等の結晶核となる材料を添加することによる結晶化速度の向上されることが報告されており¹³⁾、これにより透過率変化が急峻となると考えられる。

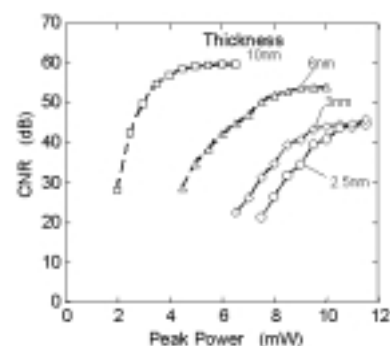


Fig. 4 The peak power dependence of CNRs.

Fig. 4のCNRの記録パワー特性とそれに続くDC消去の実験から、膜厚2.5 nmの記録材料が、レーザー光により結晶化とアモルファス化ができ、かつその可逆性があるという相変化光ディスクの基本性能を確認した。

一方記録パワーは、3 nm以下の膜厚では、実験系のパワー不足のためCNRの飽和が確認できなかったが、記録に必要なパワーを記録開始パワーの2倍で計算すると、2.5 nmは16 mW、3 nmは14 mWとなる。

また、膜厚2.5 nm、3 nmにおいて、1回のDC光照射では、数dBと消去率が不十分であったが、これには薄膜化したことによる結晶化速度の低下が原因であり、上記の記録層に結晶核となる材料を添加するなどの対策が必要である。

5.2 記録膜の薄膜化による多層化の可能性

高い透過率と相変化を確認した薄膜の光学特性・記録特性を元に多層ディスクの実現性について考察する。Fig. 5は、レーザー光による記録を確認した4種類の情報層を積層した4層ディスクの構成例を示す。記録膜の厚みは、L0から順に10 nm、6 nm、3 nm、2.5 nmであり各層の間は、UV樹脂からなる中間層により分離した構成である。

Table 2に単独層の透過率と記録パワーと、積層した場合の各層への到達光量と記録パワーの計算結果を示す。単層は実測値であり、2層、4層は光源側の情報層の透過率を含めた光学計算結果である。記録パワー18 mWが実現すると4層記録が可能となることを示している。記録密度25GB/層としたので、100 GB容量の記録に相当する。

Table 2とFig. 4を元に、2層ディスクから4層ディスクとする場合の課題を考察する。4層ディスクの透過率は、Table 1で示した目標値を満たしている。4層ディスクでは、入射光に対する1層が吸収する割合が小さくなり、L0層では入射光の28%となり、記録するパワーは2層の1.8倍の18 mWが必要である。他の情報層についても、16 mW～18.2 mWとほぼ同じパワーが予想され、情報層のパワー配分としては十分といえる。なお、2層ディスクに必要な記録パワー10 mWに必要な光源の出力は、50 mW近傍であり、記録パワー18 mWを実現するためには、出力100 mWクラスの青色レーザー光源が必要である。

一方再生時には、記録と同様に、L0層に到達する光量は2層ディスクの55%となるため、これを補償するために

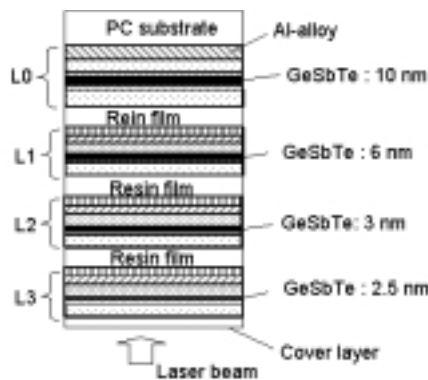


Fig. 5 Cross-sectional view of the quadruple-layer disk.

再生パワーを1.8倍に高める。しかし反射光は再度L2, L3により減衰し、光検出器上では55%の光量となってしまふ。このため光検出系としては、2層ディスクの場合よりも5 dBの検出感度向上が必要である。これらの2つの条件を満たす記録系の実現が、書換え型の4層ディスクに求められる必要条件である。

さらに、膜厚1～2 nmの記録膜での結晶化の実現により、8層化への展開が可能となる。なお、この場合の記録パワーはTable 2の2層、4層の関係から、8層では40 mWクラスが想定され、200 mWクラスの光源が必要となる。このようにレーザー光の高出力化により、薄膜の材料への記録が容易に検証できるようになり、多層化開発が加速される。

5.3 薄膜化と透過率バランス設計

記録層を薄膜化した場合の、光源側の情報層の記録・未記録による奥の層への影響を抑制する透過率バランス設計の可能性に明らかにするために、膜厚に対する透過率を計算した結果をFig. 6に示す。

膜構成は、基板上に下誘電体膜/記録膜/上誘電体膜からなる3層を積層した構造とした。黒丸が結晶状態の透過率、白丸がアモルファス状態の透過率を示す。膜厚6 nm以下(透過率50%以上)において、アモルファス相と結晶相で、ほぼ同じ透過率となっている。従ってこの厚さの薄膜を積層した多層ディスクは、層間干渉の課題の項で説明した半透過層の記録状態が奥の層に影響しない透過率バランス設計が可能である。

透過率バランス設計を可能とした理由は、光学定数の変化の方向と変化量に相関があると考えている。Fig. 7は、 $\text{Ge}_4\text{Sb}_2\text{Te}_7$ 薄膜の相変化に伴う光学定数の波長依存性を示す。屈折率nは、波長が短くなるにつれ、アモルファ

Table 2 Calculated optical characteristics of each layer at the wavelength of 405nm.

	Single-layer		Dual-layer		Quadruple-layer	
	d (nm)	Tc (%)	Tp (mW)	Tp (%)	Tp (mW)	Tp (%)
L0	10	0.0	5.0	51.3	9.7	28.2
L1	6	51.3	10.0	100.0	10.0	55.0
L2	3	71.2	14.0			77.3
L3	2.5	77.3	16.0			100.0

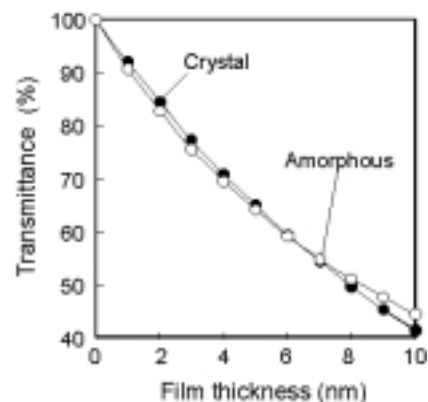


Fig. 6 The dependence of a transmittance of $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ film thickness.

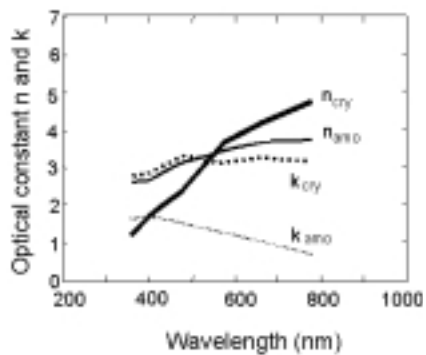


Fig. 7 The dependence of optical constants of $\text{Ge}_4\text{Sb}_2\text{Te}_7$ film on wavelength.¹⁰⁾

ス相，結晶相共に低下するが，結晶相の低下量が大きいために，550 nm近傍で逆転し，405 nmではアモルファス相の値が高くなる．一方消衰係数 k は，波長が短くなるにつれ変化量は減少するが，結晶化により値が増大する傾向を維持している．波長405 nm近傍においては， GeSbTe 材料がアモルファス相と結晶相の光学定数の n と k の変化が逆であり，かつその値の絶対値が近いために透過率の差が小さいと考えている．以上のように，広い膜厚範囲において透過率バランスが実現できる GeSbTe 系材料は，多層化に適した材料であるといえる．

6. まとめ

GeSbTe 系相変化材料を用いて，薄膜化による多層化の可能性を検討した．結晶化温度の評価から記録層の膜厚2 nmまで結晶化が可能であることを確認した．膜厚2.5 nmのディスクを試作し，波長405 nmにおいて透過率77 %と，レーザー光によるCNR45 dBの信号記録とその可逆性を確認した．また，記録層を薄膜化した場合においても，半透明層の記録状態が他の情報層に影響を及ぼさな

い透過率バランス構造を実現できることを確認した．

透過率の異なる単独層の実験結果を元に，4層ディスク設計を行い，記録材料の結晶化速度と，レーザー光の高出力化，検出光系の高感度化の課題を明確化し，100 GBの書換えメディア実現の可能性を示した．特に，多層化には，媒体開発と共に青色レーザー光源の高出力化が必須であり，4層化には100 mW，8層化には200 mWクラスの実用化が待たれる．

相変化材料を用いた書換え型光ディスクは，記録膜の薄膜化と光源の高出力化により着実に積層数を増大し，少なくとも200～300 GBの記録容量が見込まれ，幅広い応用が期待できる．

参考文献

- 1) K. Osato, K. Yamamoto, I. Ichimura, F. Maeda, Y. Kasami, and M. Yamada: *Proc. SPIE*, **3401**(1998)80.
- 2) 貴志 俊法, 富山 盛央, 宮本 寿樹, 井上 清, 永島 道芳: 第56回応用物理学会学術講演会予稿集 29p-ZA-5, (1995)959.
- 3) K. Nishiuchi, H. Kitaura, N. Yamada, and N. Akahira: *Jpn. J. Appl. Phys.* **37**(1998)2163.
- 4) K. Nagata, N. Yamada, K. Nishiuchi, S. Furukawa, and N. Akahira: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**(1999)1679.
- 5) T. Akiyama, M. Uno, H. Kitaura, K. Narumi, R. Kojima, K. Nishiuchi, and N. Yamada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**(2001)1598.
- 6) K. Hayashi, K. Hisada, and E. Ohno, *Tech. Dig: ISOM 2001 Pd-33*, (2001)312.
- 7) H. Kitaura, K. Hisada, K. Narumi, K. Nishiuchi, and N. Yamada: *Proc. SPIE*, **4342**(2002)340.
- 8) K. Narumi, T. Akiyama, N. Miyagawa, T. Nishihara, H. Kitaura, R. Kojima, K. Nishiuchi, and N. Yamada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**(2002) 2925.
- 9) N. Yamada, R. Kojima, M. Uno, T. Akiyama, H. Kitaura, K. Narumi, and K. Nishiuchi: *Proc. SPIE*, **4342**(2002)55.
- 10) 山田 昇: *レーザー研究* **28**(2000)585.
- 11) T. Nishihara, R. Kojima, N. Miyagawa, and N. Yamada: *Proc. 14th Sympo. on PCOS 2002*(2002)80.
- 12) *Blu-ray Disc Rewritable Format, part 1, Basic Format Specifications, Version 1.0*, (2002).
- 13) R. Kojima and N. Yamada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**(2001)5930.