

相変化光ディスクの高密度記録技術

赤平 信夫

カルコゲン材料を用いた電気的スイッチング素子が1968年に提案されて以来¹⁾、結晶と非晶質（アモルファス）の2つの相間の可逆的な変化を用いた情報記録の研究開発が続いている。レーザー光による光記録²⁻⁴⁾の実用化は、高出力で低ノイズの半導体レーザーと結晶化速度の大きいゲルマニウム-テルル（Ge-Te）系⁵⁾やゲルマニウム-アンチモン-テルル（Ge-Sb-Te）系材料⁶⁾の開発によってはじめて達成された。松下電器が最初の相変化書換型の製品として直径130mmのデータファイル用ディスクを発売したのは1990年のことである。

相変化光ディスクは、

- (1) 記録に外部磁界を必要としないので磁気ヘッドが不要で、光ヘッドだけで記録再生が可能
- (2) 記録・消去はレーザーのパワー変調のみでダイレクトオーバーライトが可能
- (3) 反射率変化を検出して信号を再生するので偏光角の回転を検出する光磁気ディスク（MO）に比べて光学系が簡単で信号量が大きい

などのいくつかの原理的な利点があり、記録再生装置（ドライブ）の低コスト化・高信頼性が期待できる。また、反射光量変化により再生信号を得ることから

(4) 成形レプリカを使う再生専用ディスク（ROMディスク）や追記型光ディスクとの互換がとりやすいという利点もあり⁷⁾、これからのマルチメディア時代の小型・低コスト・大容量ディスクメモリーとして有望視されている。

ここでは、相変化光ディスクの概要と、開発中の600nm台の波長のレーザー光、レンズNA0.6の光学系と

厚さ0.6mmの薄型基板を用い、現在の4倍密に相当する120mmディスク片面に2.6GBの容量をもつ相変化光ディスクの技術について紹介する。

1. 相変化光ディスクの概要

1.1 相変化光記録の原理

相変化光ディスクは、基板の記録薄膜をレーザー光照射によって加熱昇温させ、その構造に結晶学的な相変化をおこさせて情報の記録・消去を行い、その相間の光学定数変化に起因する反射率の変化を検出して情報の再生を行う（図1参照）。

アモルファス-結晶間の相変化の場合アモルファス状態は、記録薄膜をレーザー光照射で融点以上に加熱昇温し、溶融した後に急冷して得られる。結晶状態は結晶化温度以上に加熱し、徐冷することにより得られる。急冷・徐冷は相対的なものであるが、一般的に安定なアモルファス状態を得るには 10^{7-9} deg \cdot s $^{-1}$ 程度の冷却速度が必要といわれている。

光ディスクとして用いるにはこの相変化を μ mオーダーの径に絞ったレーザー光の照射により実現しなくてはならない。例えば直径1 μ mのレーザービームが10m/sの線速度で通過するとき、ディスク上のある点に光が照射される時間は100nsにすぎず、このオーダーの時間内で相変化現象を実現しなければならない。アモルファス化は溶融・急冷で得られるためレーザーパワーの許す範囲でその時間を短くすることができるが、結晶化は原子の再配列であるから材料物性に依存する結晶化に要する時間が必要である。すなわち、相変化光ディスクに用いられる材料にはアモルファス状態が安定であるだけでなく、100nsのオーダーの短い時間内で結晶化す

松下電器産業(株)光ディスク開発センター(〒570 守口市八雲中町 3-1-1)

ることが要求される。結晶化に長い時間を要する材料の場合には、消去（結晶化）にはトラック方向に細長い形状の光ビームを用いて実質的な光の照射時間を長くする2ビーム消去法を使うことが試みられたこともある⁹⁾。

材料の結晶化速度が十分に大きく（結晶化時間が短く）レーザービームの通過時間内に結晶化が可能であれば、図2のようにレーザーパワーを記録（アモルファス化）のためのピークパワーと消去（結晶化）のためのバイアスパワーの間で変調することで、1つのビームを用いてすでに記録されている信号を消去しながら新しい信号を記録するいわゆるオーバーライト（単一ビームオー

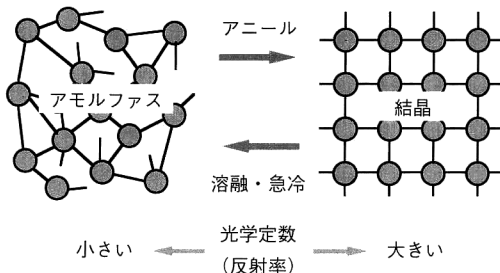


図1 相変化記録の原理。

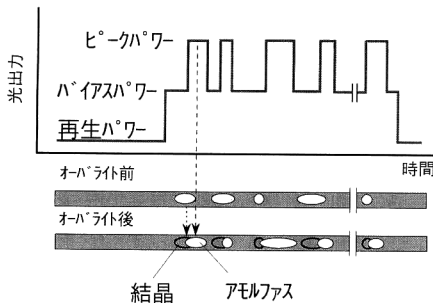


図2 相変化記録の光変調オーバーライト。

バーライト)⁹⁾が可能になる。

1.2 相変化光ディスクの材料・構造

結晶化速度とアモルファス状態の安定性の双方の特性を満たす Ge-Sb-Te 等の材料が見いだされて、始めて実用的な書換え可能な相変化光ディスクが実現された。

Ge-Sb-Te 系 3 元組成の材料は常温での真空加熱蒸着法やスパッタリング法により安定なアモルファス薄膜が得られる。特に化合物組成 GeTe と Sb_2Te_3 との組合せからなる化学量論組成およびその周辺の組成で結晶化速度が大きく、100 ns 以下の短時間の光照射で結晶化する。これは、この付近の組成では面心立方の準安定相の結晶構造があり結晶化に原子の移動が最小限ですむためであると考えられている^{6,10)}。現在の製品に用いられているのは $Ge_2Sb_2Te_5 + 0.3Sb$ 近傍の組成である¹¹⁾。

図3に相変化光ディスクの構造を示す。記録薄膜層の両側に ZnS-SiO₂ 系の高融点誘電体の保護層¹²⁾で挟み、さらに Al 合金の反射層を設けた 4 層構成を用いている。保護層・反射層には記録薄膜の耐湿性の向上、基板の熱的な変形の防止という保護機能、吸収を増大させかつ反射率変化を大きくするという光学的な効率の向上（エンハンスメント）の機能、そして記録時の熱条件の制御機能の3つの働きをもたせてある。相変化光ディスクにおいては材料組成と同様に各薄膜層の膜厚構造設計が重要な技術要素である。それは、この構造により光学的特性、熱的特性および機械的特性のすべてが影響を受けるからである。光学的には、光の吸収効率が大きく信号すなわちアモルファス部と結晶部の反射率差が大きいたことが要求される。熱的には昇温効率とともにアモルファス化のための冷却速度が重要であり、両者のバランスが要求される。機械的には繰返し昇温・冷却による熱ストレスに耐える周辺材質・構造が重要である。これらを総合して、相変化記録層および記録層と金属反射層の間

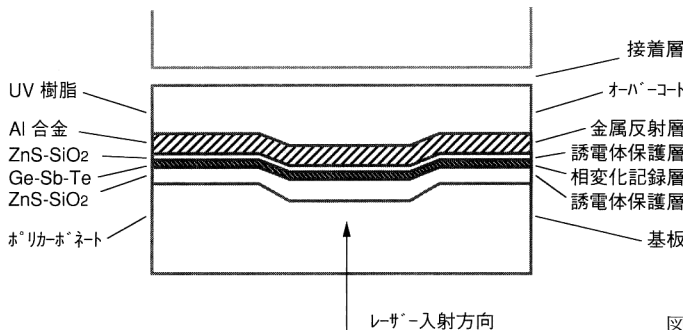


図3 記録薄膜構造。

の誘電体保護層が薄いわゆる急冷構造を用いて、記録層を変化させるのに必要な熱エネルギーが他の層なるべく影響を及ぼさないような工夫をしている¹¹⁾。その結果、繰返し記録可能回数も100万回以上を達成している¹³⁾。媒体の保存寿命も実用的に十分であることが確認されており、通常のオフィス環境(32°C, 80%)で60年以上と推定されている¹⁴⁾。

2. 高密度化技術

現在製品化されている相変化光ディスクは一例として直径120mmの片面ディスクで650MBのユーザー(フォーマット)容量をもっている。表1に示すように、波長780nmの半導体レーザーを用いてトラックピッチが1.2μm、最短ビット長(論理ビット長)が0.9μmで、面記録密度が0.92Mbit/mm²である¹⁵⁾。

現在この記録密度をさらに向上させるために、いくつかの新しい技術が開発されている。ひとつは記録再生に用いるレーザーの波長を短く、レーザー光を絞る対物レンズの開口数(NA)を大きくしてビームを細く絞り記録密度を向上させる試みである。さらに記録密度を向上させる技術としてマーク長(エッジ)記録(2.2節参照)とランド・グループ記録(2.3節参照)がある。マーク長記録は線密度の向上、ランド・グループ記録はトラック密度を向上させる技術である。これらの技術を用いて表1のように現在の4倍の記録容量が可能である。

2.1 単波長化・高NA化

表2に示すように現在の製品ではレーザー波長とNAはそれぞれ780nm、0.5であるが、これを650nmおよび0.6にすることで約2倍の記録密度向上が見込まれる。記録には30mW以上の高出力レーザーが必要だが、波長680nmについて650nmのものも実用化されている。高NAレンズはディスクの基板の傾きにより収差を発生しやすくなるが、表2に示すように収差はNAの3乗に比例し基板厚 t に比例するので、基板厚を従来の1.2mmから半分の0.6mmにすることでほとん

ど同等の収差に抑えることができる。基板厚0.6mmを使い、両面貼合わせの対称構造にして耐環境特性を向上させる。このような0.6mm厚の薄形基板の成形や貼合わせ技術も近年開発され実用化されている。

2.2 マーク長記録

従来は記録マークの中心に信号を対応させるマーク位置(ポジション)記録といわれる記録方式を用いていたが、記録マークの両端(エッジ)に信号を乗せるマーク長記録にすると同じ最短マーク長でも線密度が向上する。マーク位置記録は記録密度は小さいがマークの歪の影響を受けにくい方法である。これに対してマーク長記録は記録密度は大きいマーク歪の影響を受けやすい。特にマーク長記録では長いマークと短いマークが混在するため、長いマークでは熱の蓄積により記録マークが涙状の形に歪んでしまう。これを避けるために図4に示すように複数の記録パルスで1つのマークを記録するマルチパルス記録法が用いられる¹⁷⁾。さらに線記録密度を大きくすると、マークの長さや間隔によってお互いの熱干渉によって異なったマークの歪が生ずる。これに対しては、記録すべき信号に応じて歪を最小に抑えるようにレーザーの変調波形を補正する記録補償技術が開発されている¹⁸⁾。これを用いて、波長680nmのレーザー光、NA0.6の光学系の実験でビット長0.35μm以下の線密度の記録が可能であることが確認された。図5はビット長0.35μmの記録の再生信号のアイパターンの実測例である。

2.3 ランド・グループ記録

従来はトラッキング用の溝(グループ)の中だけに記録マークを形成していたが、溝と溝の間のランド部にも記録を行うランド・グループ記録という方法が開発された(図6参照)。この方法だと従来の基板成形技術、トラッキングサーボ技術のまま2倍のトラック密度が得られるという利点がある。ただ、トラックピッチを小さくすると隣のトラックの信号を読んでもうクロストークの課題があるが、相変化記録のように反射率変化で再生する場合は、溝の深さをレーザー波長のおよそ1/6付

表1 相変化光ディスクの記録密度(現行と次世代)。

	現行製品	次世代仕様(案)
波長(nm)	780	650
NA	0.50	0.60
記録方式	マーク位置	マーク長
ビット長(μm)	0.90	0.41
ガイドトラック	グループ	ランド・グループ
トラックピッチ(μm)	1.2	0.74
記録密度(Mbit/mm ²)	0.92	3.30
容量/φ120mm片面	650MB	2.6GB

表2 短波長化・高NA化による密度向上。

	現行製品	次世代
波長(λ)(nm)	780	650
開口数(NA)	0.5	0.6
基材厚(t)(mm)	1.2	0.6
ビーム径による密度 $\alpha\left(\frac{NA}{\lambda}\right)^2$	1	2.07
チルトによる収差 $\alpha\frac{t}{\lambda}(NA)^3$	1	1.04

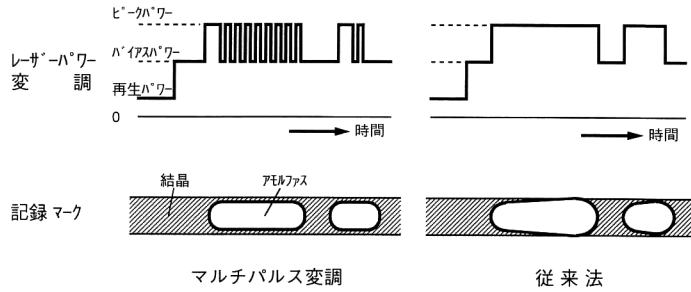


図4 マルチパルスを用いたマーク長記録.

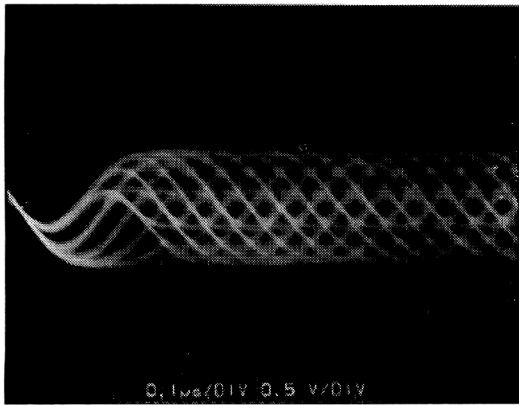


図5 0.35 $\mu\text{m}/\text{ビット}$ のアイパターン (イコライザなし).

近に設定すると反射光の位相差によりクロストークが低減される¹⁶⁾. この原理を用いて波長 680 nm のレーザー光, NA 0.6 の光学系でトラックピッチ 0.7 μm でもクロストークの影響のほとんどない記録再生ができることが確認されている.

ランド・グループ記録でクロストークが低減される理由を図7を用いて簡単に説明する. 図7においてランド上をレーザービームが走査した場合のグループからのクロストークを考える. 図のA点では両側のグループには記録マークがなく, B点では両側に記録マークがあるとする. また記録マークの反射率は十分低い無反射条件であり, 未記録部の反射率は十分高いとする. 一般的に相変化光記録膜はこのような条件で設計されている. クロストークの原因は隣のトラックに記録マークがある場合とない場合との対物レンズを通して検出器に到達する反射光量の差にある. そこで, A点とB点における反射光量のグループ深さ依存性を考えてみる.

図7(a)はA点における反射光量のグループ深さ依存性を示す. グループもランドも反射率は高いので, 両者からの反射光は互いに干渉し合い検出器に到達する光量は減少し, 深さが光学長で1/4波長のとき最も小さくな

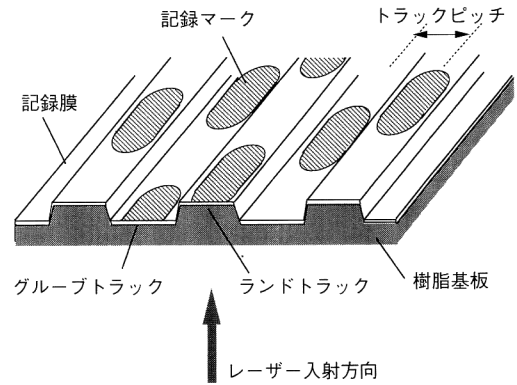


図6 ランド・グループ記録.

る. 図7(b)はB点における反射光量のグループ深さ依存性を示す. 記録マークの反射率は0%だからグループからの反射光はなくランドからの反射光のみであるから全反射光量はグループ深さに関係なく一定である. またグループ深さがゼロのときはA点の反射光量がB点のそれより大きく, グループ深さが1/4波長のときはB点の方が大きい. したがってA点とB点の両者の反射率が等しくなる深さ D_0 が存在する. すなわち隣のトラックにマークのあるなしにかかわらず反射光量が等しい. これは, とりもなおさずクロストークがないことを意味する.

以上是最も簡略化されたモデルでの説明であり, 実際を説明するには再生トラック (図ではランド) にも記録マークがある場合や, 記録マークはグループあるいはランド幅より狭い幅をもつ, といったより実際に即したモデルで考えなければならない. ランダムに信号が記録された場合のジッターにおいても深さ 1/6 波長近辺でクロストークの影響が最も少ないことがシミュレーションにより示されている.

相変化記録のようなヒートモード記録ではトラックピッチを小さくしていくと記録時に熱的な影響で隣のトラックの信号を部分的に消してしまう (クロス消去) 可能

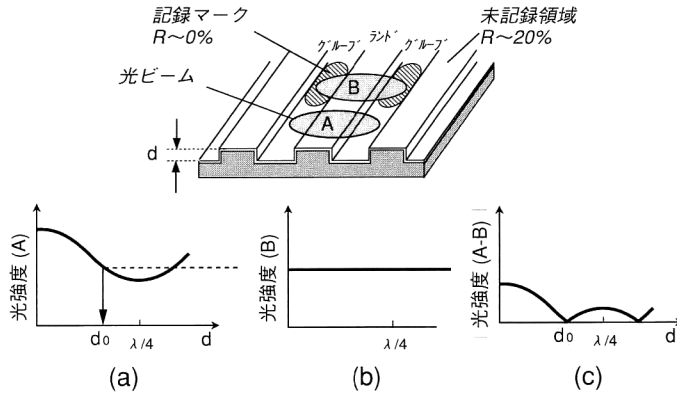


図7 クロストーク低減の原理。

性がある。ランド・グループ記録でもクロストークと同時にこのクロス消去特性を確認する必要がある。トラックピッチ $0.7\ \mu\text{m}$ のランド・グループ記録で両隣のトラックに繰返し1万回以上オーバーライトを行っても再生信号のジッターは変化しないことが確かめられている¹⁹⁾。

図8にトラックピッチ $0.74\ \mu\text{m}$ のランド・グループ記録と、最短マーク長 $0.61\ \mu\text{m}$ (ビット長 $0.41\ \mu\text{m}$) のマーク長記録を組み合わせた高密度記録状態の記録薄膜の電子顕微鏡写真を示す。

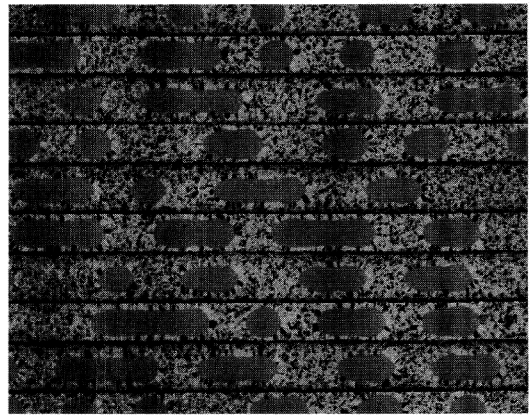


図8 ランド・グループおよびマーク長記録状態の透過電子顕微鏡像。

3. オーバーライト特性

ここでは現行の4倍容量相当の相変化光ディスクの測定結果を示す。測定には $680\ \text{nm}$ の半導体レーザーと $\text{NA}0.6$ の対物レンズを用いた光学系を使った。相変化記録層は厚さ $0.6\ \mu\text{m}$ のポリカーボネート基板上に成膜された。最短マーク長 $0.61\ \mu\text{m}$ (8-16変調でビット長 $0.41\ \mu\text{m}$ に相当) のマーク長記録を行った。トラックピッチはランド・グループ記録で $0.74\ \mu\text{m}$ である。ディスクとレーザービームの相対線速度は $6.0\ \text{m/s}$ で実験した。ビット長 $0.41\ \mu\text{m}$ であるからこの速度は $14.6\ \text{Mbps}$ のチャンネル転送レートに相当する。

基板を従来の光ディスク基板と同じ製法を用いて作ったところ、ランドとグループではそれぞれ表面性が異なりランドに記録されたマークからの再生信号の方がグループのそれよりも約 $2\ \text{dB}$ ノイズが大きかった。これはフォトレジストを用いた原盤プロセスでは、ランドはフォトレジスト表面から転写され、グループはガラス表面から転写されるからである。そこで本実験ではディスクの各層の厚さをこのノイズ差を相殺するように、ランドからの再生信号の振幅がグループからの再生信号よりも

大きくなるように設計した。これにはアモルファス状態と結晶状態からの反射光が反射率(振幅)だけでなく位相が変化することを利用している²⁰⁾。

3.1 記録・消去パワー特性

図9にこのディスクの再生信号の振幅とCN比の記録ピークパワー依存性いわゆるパワー特性を示す。この場合バイアスパワーは消去率 $30\ \text{dB}$ 以上を示すパワーの中心値に固定している。ピークパワー、バイアスパワーは図2および図4に示すパワーで、ピークパワーは記録膜を溶融してアモルファス化するパワー、バイアスパワーは記録済みのアモルファス部分を結晶化するパワーである。図9に示すようにランドとグループではほぼ同等の感度とCN比が得られている。記録パワー $9\ \text{mW}$ 以上でCN比 $50\ \text{dB}$ 以上が得られ現在の $680\ \text{nm}$ の半導体レーザーのパワーで十分実用化が可能である。図10は消去率の消去バイアスパワー依存性を示す。ランド、グ

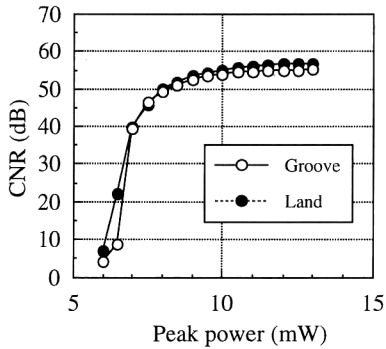


図9 CN 比の記録（ピーク）パワー依存性.

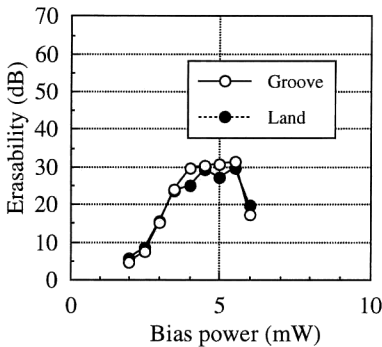


図10 消去率の消去（バイアス）パワー依存性.

グループとも消去率 30 dB 以上を示すパワーの範囲が約±20%と広いマージンをもっていることがわかる。

3.2 オーバーライト繰返し特性

図11にランドおよびグループトラックで繰返しオーバーライトしたときの8-16変調信号のジッターの変化を示す。記録ピークパワーは10.5 mW、バイアスパワーは4.3 mWである。2本の線はそれぞれ信号の上がりとし下がり（マーク前端間と後端間に相当）のジッターである。ジッターは標準偏差をウィンドウ幅で規格化している。図に示すようにランド、グループとも 10^5 回（10万回）繰返し記録後でもジッターは実用的に十分な値である13%以下に収まっている。

前述のように記録メディアにおいては狭トラックピッチにしたときの光学的なクロストークだけではなく、トラック間の熱的な干渉という課題も存在する。記録時の熱的な影響が隣のトラックの記録状態を悪化させないことも確認する必要がある。トラックピッチ $0.74 \mu\text{m}$ の両隣のトラック（ランドならグループ、グループならランド）にそれぞれ 10^5 回繰返し記録を行ったときにも中央のトラックからの再生信号のジッターが増加しないこ

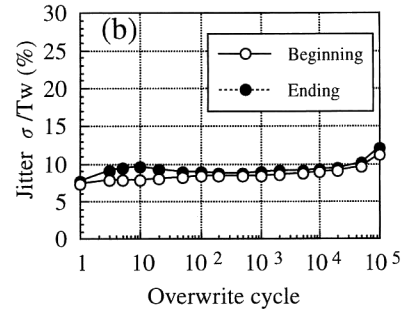
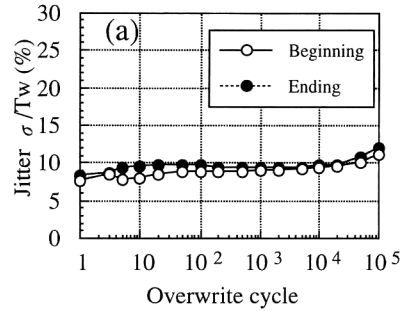


図11 繰返しオーバーライト時のジッター変化。(a)ランド、(b)グループ。

とが確かめられている。以上のように4倍容量の仕様において10万回以上の繰返しオーバーライトが可能ながことが確かめられている。

相変化光ディスクの概要と最近の高密度記録技術について説明した。4倍密度での測定の結果、現状の680 nmの半導体レーザーを用いて、感度、繰返しパワーマージンとも十分実用レベルにあるという結果を得ている。

Ge-Sb-Te系の材料は400 nmの短波長でも光の吸収と反射率変化があるため、今後記録パワーの出せる半導体レーザーの短波長化が進めばそれに応じて高密度化が期待できる。今世紀末には現在の10倍程度の記録密度が達成されるであろう。

文 献

- 1) S. R. Ovshinsky: "Reversible electrical switching phenomena in disordered structures," *Phys. Rev. Lett.*, **21** (1968) 1450-1453.
- 2) J. Feinleib, J. deNeufville, S. C. Moss and S. R. Ovshinsky: "Rapid reversible light-induced crystallization of amorphous semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, **18** (1971) 254-257.
- 3) M. Terao, H. Yamamoto, S. Asai and E. Maruyama: "Reversible amorphous optical memory," *Proc. 3rd*

- Conf. on Solid State Devices* (1971) pp. 68-75.
- 4) A. W. Smith: "Injection laser writing on chalcogenide films," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 795-798.
 - 5) M. Chen, K. A. Rubin and R. W. Barton: "Compound materials for reversible phase-change optical data storage," *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 502-504.
 - 6) N. Yamada, E. Ohno, N. Akahira, K. Nishiuchi, K. Nagata and M. Takao: "High speed overwritable phase change optical disk material," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory 1987*, Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 61-66.
 - 7) S. Ohara, T. Ishida, C. Inokuchi, T. Furutani, K. Ishibashi, A. Kurahashi and T. Yoshida: "Compatibility test for phase change erasable and WORM media in multifunction drive," *Proc. SPIE*, **1499** (Optical Data Storage '91) (1991) 187-194.
 - 8) M. Takenaga, N. Yamada, S. Ohara, K. Nishiuchi, M. Nagashima, T. Kashihara, S. Nakamura and T. Yamashita: "New optical erasable media using tellurium suboxide thin film," *Proc. SPIE*, **420** (Optical Storage Media) (1983) 173-177.
 - 9) T. Nishida, M. Terao, Y. Miyauchi and S. Horigome: "Single-beam overwrite experiment using In-Se based phase-change optical media," *Appl. Phys. Lett.*, **50** (1987) 667-669.
 - 10) N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi and N. Akahira: "Rapid-phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ Pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory," *J. Appl. Phys.*, **69** (1991) 2849-2856.
 - 11) T. Ohta, K. Inoue, M. Uchida, K. Yoshioka, T. Akiyama, S. Furukawa, K. Nagata and S. Nakamura: "Phase change disk media having rapid cooling structure," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory, 1989*, Jpn. J. Appl. Phys., **28**, suppl. 28-3 (1989) 123-128.
 - 12) 胡桃沢利光, 高尾正敏, 木村邦夫, 長田憲一: "光ディスク用耐熱保護層の開発", 第 35 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 28 p-ZQ-3 (1988) p. 839.
 - 13) T. Ohta, M. Uchida, K. Yoshioka, K. Inoue, T. Akiyama, S. Furukawa, K. Kotera and S. Nakamura: "Million cycle overwritable phase change optical disk media," *Proc. SPIE*, **1078** (Optical Data Storage Topical Meeting) (1989) 27-34.
 - 14) T. Ohta, S. Furukawa, K. Yoshioka, M. Uchida, K. Inoue, T. Akiyama, K. Nagata and S. Nakamura: "Accelerated aging studies for phase change type disc media," *Proc. SPIE*, **1316** (Optical Data Storage) (1990) 367-373.
 - 15) T. Ishida, S. Ohara, N. Akahira, T. Ohta and T. Yoshida: "Overwrite characteristics in phase change optical disk," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory 1989*, Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3 (1989) 129-133.
 - 16) N. Miyagawa, Y. Gotoh, E. Ohno, K. Nishiuchi and N. Akahira: "Land and groove recording for high track density on phase-change optical disks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) 5324-5328.
 - 17) E. Ohno, K. Nishiuchi, K. Ishibashi, N. Yamada and N. Akahira: "Multipulse recording method for pulse-width modulation recording on an erasable phase change optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 677-681.
 - 18) T. Ishida, M. Shoji, Y. Miyabata, Y. Shibata, E. Ohno and S. Ohara: "High density mark edge recording on a phase change disk by a 680-nm laser diode," *Proc. SPIE*, **2338** (Optical Data Storage '94) (1994) 121-126.
 - 19) K. Nishiuchi, E. Ohno, N. Miyagawa, K. Ide, Y. Sakaue and N. Akahira: "High track density recording on phase-change optical disks using land and groove method," *Technical Digest of Topical Meeting on Optical Data Storage '94 PD 3-1* (1994).
 - 20) E. Ohno, K. Nishiuchi, Y. Sakaue, K. Ide, K. Nishiuchi, N. Miyagawa and N. Akahira: "Phase change optical disks for land and groove recording," *Proc. Symp. on Optical Memory '94, TuA 3* (1994) p. 39.

(1996年9月19日受理)