

複屈折結晶を用いた光磁気ディスク用光学ヘッド

西 紀 彰・豊 田 清

1982年にCompactDisc(民生用光ディスクの一規格名、以下CDと略記)が商品化されて以来、光ディスクはわれわれの生活に身近な技術となった。CDの登場から10年後の1992年には、民生用小型光磁気ディスクの一規格として、MiniDisc(以下MDと略記)が実用化された。このMDは直径64mmに最大74分の圧縮した音楽データを繰り返し記録可能な光磁気ディスクである。MDは現在までの光ディスクの中で、最も小さく、最も身近な書き換え可能ディスクであるといえる。今後よりいっそうこのMDを身近なものにしていくためには、ポータブル機のいっそうの小型化、車載用途においてはよりいっそうの高信頼性化、そしてよりいっそうの低価格化が望まれる。そしてそのためには、キーデバイスである光学ヘッドの小型・薄型化、信頼性・生産性の向上、低コスト化が必要不可欠であるように思われる。

今回は、これらの不可欠な要素を、複屈折性結晶からなるマイクロプリズムを用いた集積光学系によって実現した新しい光学素子、MiniDisc laser coupler (MDLC)^{1,2)}について紹介する。

1. MDLCの特徴

MDLCの開発に当たり、筆者らはまずMD用光学ヘッドに望ましい構成を考えた(図1)。

集積光学系としては、例えばCD用ではすでに、受発光部を一体化した集積素子として、CD laser coupler (CDLC)³⁾が実用化されている。集積化により、ディスクリート光学系に比べて経時・環境変化に強い“高信頼性”光学ピックアップが実現されている(図2左下図参照)。MD

用においても図1に挙げたように、光学系の集積化による効果は大きいと考えられる。しかし、MD用の集積光学系の開発は容易ではない。というのも、MDフォーマットは、CDと同様にあらかじめマスタリングされたピットディスクと、繰り返し記録再生可能な光磁気グループディスクとの両方をサポートしており、MDシステムでは、CDシステムに必要なフォーカスエラー、トラッキングエラー、ピットディスクのRF信号に加えて、光磁気ディスクのRF信号、プリグループのウォブリングによりあらかじめ記録されたアドレスとクロックの情報信号であるaddress in pre-groove(以下ADIPと略記)信号、レーザーパワーをモニターする信号を検出する必要がある。このように、MD用光学ヘッドでは、必要とされる機能が多いため、CD用に比べると、どうしても部品点数が多く、構成が複雑化してしまう傾向にある。図2の左上側にあるのが、現在もっとも一般的なMD用光学ヘッドの光学系であるが、大きく分けて、9つもの機能部品から構成されていることがわかる。

そこで今回筆者らは、サーボシステム全体を含めて、先に図1に挙げた項目を満足するために、光学構成を見直した。その結果、従来は個々の機能部品に個別にもたせていた「機能」自体を複合化し、「結晶単体からなるマイクロプリズム」「半導体レーザー(laser diode, 以下LDと略記)」「ICを内蔵した受光素子(photo diode, 以下PDと略記)」を直接貼り合わせる構成(図2右上)が最良であろうという結論に至った。結晶材料の導入によって、図2のような製造容易な単純な形状でありながら、MD用光学ヘッドに必要なすべての「機能」が集積化できている。

ちなみに、MDシステム用集積光学系においては、MDLC以外にもこれまでに、実現例としてラミネートプリズム方式⁴⁾、報告例としてホログラム方式^{5,6)}がある。前者では、MDに必要な構成機能部品を、光学多層膜や反射

ソニー(株)コンピュータペリフェラル&コンポーネントカンパニー光デバイス事業部(〒141-0001 東京都品川区北品川 6-7-35)
E-mail: nori2@edmd.sony.co.jp

型ホログラムによって、6枚の平板の両面にうまく配置させることによってラミネートプリズム化している。また後者では、構成機能部品を、サーボ信号はホログラムに、光磁気再生信号はプリズム検光子⁵⁾、あるいは光導波路型検光子⁶⁾に分けて構成している。これらの方式では、「機能」の複合化は行わず、高い製造技術力を活用することによって、各機能部品の構成自体は維持したまま集積化するというアプローチの仕方をとっているようである。

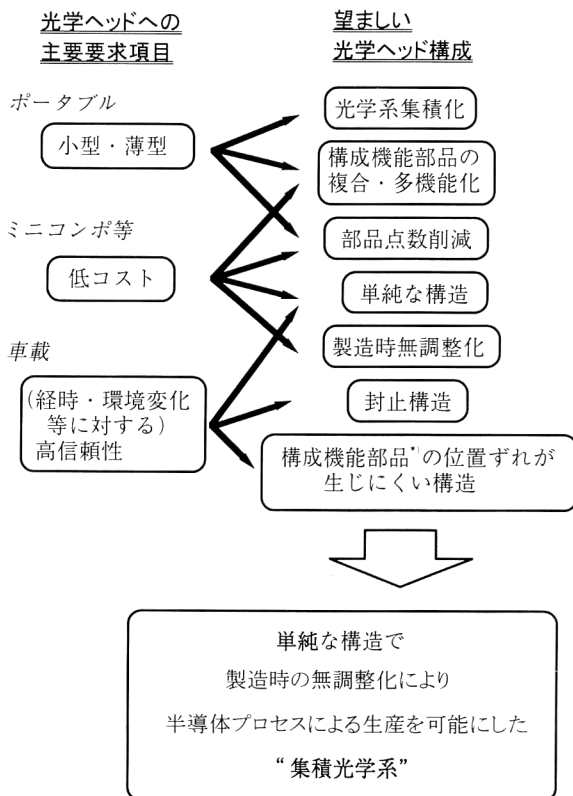
2. MDLC の光学構成

2.1 MDLC における光路

図2のように、MDLCでは、レンズ以外のすべての構成部品を、2軸性結晶KTP (KTiOPO₄) からなる、唯一の貼り合わせのないマイクロプリズムに置き換えている。

まずLDを出射した光は、KTPマイクロプリズム斜面のビームスプリッター膜によって反射されてディスク上に集光される。ディスクからの戻り光はマイクロプリズムに入射し、ビームスプリッター膜を透過、プリズム下面に設けられたハーフミラー膜によって、分割される。ハーフミラー膜を透過した光は、PD“A”によって受光され、反射した光は、再びプリズムの上面の高反射膜によって反射されて、PD“I”“J”に至る。

斜面において、複屈折性結晶によって屈折された光は異なる固有偏光方向と光線方向をもつ2つの光線に分離される。“A”の位置では、2つのスポットがほとんど重なって



*) 構成機能部品・・・レンズ、ビームスプリッター、受光素子、ウォラストンプリズム、回折光学素子等

図1 MD用光学ヘッドに望ましい構成。

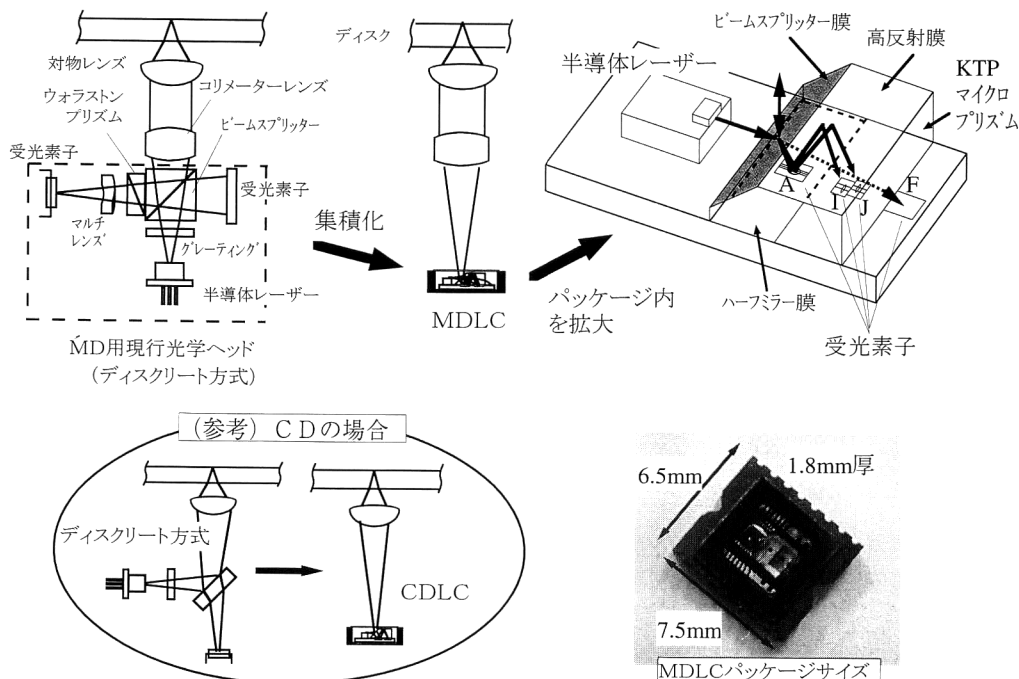


図2 現行ディスク方式とMiniDisc laser coupler.

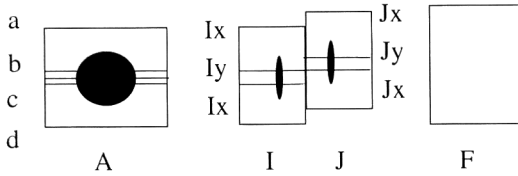


図3 MDLCにおける信号検出法. フォーカスエラー= $K\{(a+d)-(b+c)\}-(Ix-Iy)+(Jx-Jy)$, K :定数, トラッキングエラーとADIP信号は $(a+b)-(c+d)$ から演算, RF信号(ピット)= $I+J$, RF信号(光磁気)= $I-J$, LDパワーモニター信号= F .

おり, 1つのスポットとして扱うことができる. “I” “J”の位置では, 2つのスポットの分離が大きくなり, それぞれが “I” “J” によって受光される. “J” のスポットは “walk-off” 現象 (次章参照) によって, 斜めにずれる.

また, LDのパワー制御のために, PD “F” に到達する光を使ってLDパワーをモニターしている.

2.2 MDLCにおける信号検出法

サーボ信号検出法は, 先に述べたフォーマット上のCDとの差異, および光磁気信号のCNR確保のために今回新規開発した (図3). MD用光学ヘッドに必要なすべての信号は, “A” “I” “J” “F” の4群のPDによって生成可能である. フォーカスエラー信号検出は, CDLCにおける手法を “walk-off” 現象を考慮して改良した (簡単には, “A” 上のスポット径と, “I” “J” 上のスポット径の変化を検出する, スポットサイズ検出). トラッキングエラー信号とADIP信号は “A” からのプッシュプル信号をもとに演算処理している (詳細はここでは割愛する). RF信号は “I” “J” から得ている.

2.3 KTP結晶

CDLCと同じ単純な形状を維持しつつ, 光磁気信号検出を集積素子内に取り込むために, MDLCではマイクロプリズムを複屈折結晶に置き換えている.

従来MO検出には水晶, LN (LiNbO_3) 等の結晶からなるウォラストンプリズムを用いているが, 今回新たに, 通常は非線形光学材料としてレーザー光の2次高調波発生等に用いられている2軸性のKTP結晶を選択した. 理由は次のとおりである.

- (1) 標準的な光学ガラスと同等の屈折率を有する

$$n_a=1.751, n_b=1.760, n_c=1.845$$

(@785 nm, CASIXカタログより)

- (2) 光線分離角が実用十分な大きさである
- (3) 材料としての供給の安定性, 環境に対する安定性, 加工のしやすさなど

3. 2軸結晶における光学設計技術

3.1 結晶内光線追跡・回折計算の必要性

現行光学ヘッドでは, ディスクからの戻り光の到達位置に対してPDが最適な位置になるように, ディスク再生信号をモニターしながら調整する方式であるため, PD部での正確なスポット位置を知るよりも, 調整範囲や調整精度を正しく見積もることが重要となる. それに対して, 本方式では, 発光素子, 受光素子と光路分岐素子 (図2の半導体レーザー, 受光素子とビームスプリッター) を同一半導体基板上であらかじめ設計された位置関係になるように無調整でマウントする. これにより, 2つの効果が得られると考えられる.

- (1) 生産性の向上

- (2) これら3つの素子を同一基板上にマウントすることによって, 部品の位置ずれによって起こる, 「受光素子とスポットとの位置関係の変化」を飛躍的に低減できる

しかし, この生産手法を用いるためには, ディスクからの戻り光の進行方向, PD面におけるスポット位置と光強度分布を正確に求め, PDの位置・形状を最適化する必要がある.

光線が到達し, スポットが形成される位置を求めるには, 実際に光のエネルギーが伝搬する方向 (および振幅) を表すポインティングベクトル S を追跡する必要がある. 通常ガラス等の等方性媒質からなる光学系の場合には, ポインティングベクトル S と, 波数ベクトル k (屈折率に等しい長さ) と波面法線の方向をもつ屈折率ベクトル n を用いて, $k=(\omega/c)n$ で表される) とが平行になり, 光線追跡はスネルの法則に従う k で代用している. しかし, 複屈折性結晶等の非等方性媒質中では, 一般に S は k とは方向が一致せず (“walk-off”現象), その結果, 光線追跡の抛り所となるスネルの法則に S が従わなくなるため, 結晶中, 特に2軸性結晶中において, S 自体を追跡できる光線追跡手法が必要となる.

また, 光強度分布を求めるためには回折計算によって回折パターンを求める必要がある. 回折計算も, 通常は k のみに基づいて行っているが, 結晶を用いる場合にはやはり S を考慮する必要があるが生じてくる.

3.2 光線追跡

結晶内での光線追跡は, “walk-off” の効果を考慮し, ポインティングベクトル S に沿って行う. 手順は大きく2つに分かれる.

- (1) 屈折率が波数ベクトル k の関数であることを考慮して, 屈折・反射後の k を求める

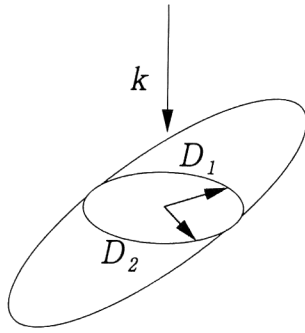


図4 屈折率楕円体とその断面の概念図、および固有偏光 D_1 , D_2 と波面法線 k との関係。

(2) k から S を求める

この光線追跡手法は、単にスポットダイアグラムを求めるためだけでなく、後述する回折計算に必要な光路長を求める際にも用いられる。光線追跡に関しては、すでに文献 7) に同様な計算手法が述べられているが、参考のため、少し説明を加えておく。

k の導出は次のようになる。マクスウェル方程式によれば、非等方性媒質中においても、波数ベクトルはスネルの法則に従うが、その波面法線方向によって、それに対応する屈折率は異なってくるため、任意の非等方性媒質における任意の屈折光・反射光に対して、その入射光との関係を表す関数を直接導出するのは容易ではない (1 軸性結晶中における式の導出は文献 8) にある)。

複屈折性媒質内を進むある光に対する屈折率は、屈折率楕円体⁹⁾を、その波数ベクトル k に垂直で原点を通る平面で切ったときにできる楕円の長、短軸の長さによって表され、その軸の方向が、その屈折率に対応する固有偏光の電束密度ベクトル D の方向と一致する (図 4)。プリズム界面では、この屈折率の違いによって、屈折する角度に差が生じるために光線分離が起きることになるが、屈折する角度によって断面の楕円の形状が変化する、すなわち屈折率が変わるため、屈折する角度と屈折率は独立ではない。波面法線方向に平行で、屈折率に比例した長さをもつ k ベクトルに対して、境界面 (と入射面とによってできる境界線) と、面法線との間で角度を変化させ、入射光と屈折光の k ベクトルの境界面への射影が等しくなるようにすることで、屈折光の波数ベクトルを求めることができる。反射光の場合も同様である。結果として、屈折する角度すなわち波面法線方向は、固有屈折率 n 、固有 D ベクトルとの組として決定される。

続いて、光線方向を表すポインティングベクトル S は次のように計算できる (図 5)。

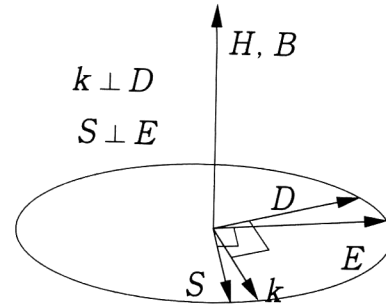


図5 “Walk-off” (S と k とのずれ)、および D , E , H , B , k and S の間の関係の概念図。

$$D = \epsilon E \rightarrow E = \epsilon^{-1} D \quad (\epsilon \text{ は 2 階のテンソル})$$

$$k \times E = \omega \mu H \quad (\omega, \mu \text{ はスカラー})$$

$$S = E \times H = E \times (k \times E) / (\omega \mu)$$

図 6(a), (b) は MDLC における光線追跡を上記の手法によって行った結果の一例であり、(a) は光路図、(b) は PD “I” “J” 付近のスポットダイアグラムを PD パターンと重ね書きした図である。結晶内では一般に、一方向につき特定の 2 つの偏光成分しか進行しないため、屈折時に加えて、結晶内での 2 回の反射によっても光線は分離する (それぞれの界面で各々のビームは 2 つに分かれる)。これにより、PD “I” “J” 付近には 8 つのスポットができている。そのうちの 2 つのスポットは完全に他のスポットに重なっているため、実際には 6 つしか見えない。

3.3 結晶内での回折計算

受光面上における光の強度分布を求めるためには、次のような多くの要素を考慮する必要がある。

- ディスクによる回折
- 多層薄膜のついた 2 軸性結晶による屈折と反射
- 結晶内での集光スポットの強度分布

まず、対物レンズの射出瞳内の各位置における偏光の方向と強度および位相の情報を、ジョーンズベクトルによって表した瞳関数を計算する。ここではディスクによる回折と偏光方向の変化の様子が考慮される。その瞳関数に収差および光学多層薄膜による複素透過・反射率の情報を掛け合わせた後、回折積分することによって、受光面上における強度分布が導出される (正確にはまず振幅が導出される。また、回折積分はフーリエ変換で近似した)。

“収差” を考える際には、ポインティングベクトルに基づいて求めた光路長を用いた。ここで光路長は $tn \cos \theta$ (t : ポインティングベクトルに沿った距離, n : 固有屈折率, θ : k と S とのなす角) で定義される。

また、結晶の表面に光学多層薄膜が形成されている場合の厳密な複素透過率、反射率を得るために、光線追跡の際に、2 つの固有偏光と、それぞれの固有偏光に対応した E

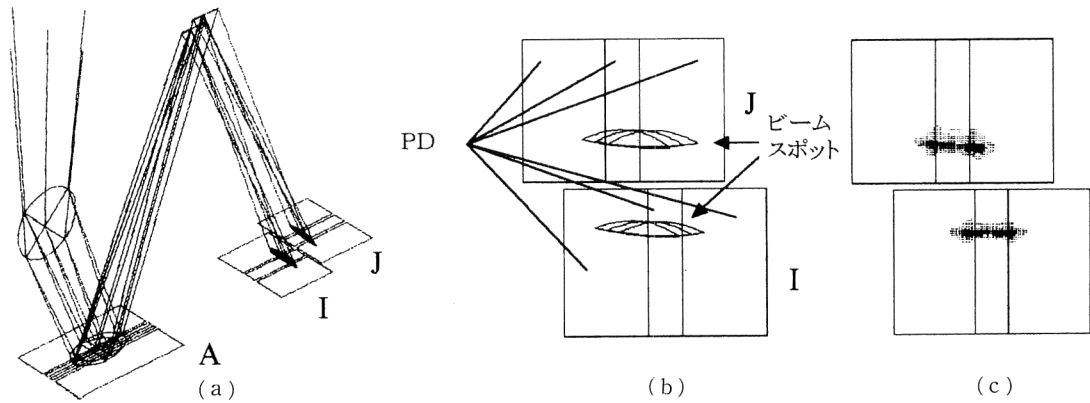


図6 MDLCにおける光路図，スポットダイアグラム，回折パターン計算結果。(a) 光路，(b) スポットダイアグラム（境界線のみ），(c) 回折パターン。

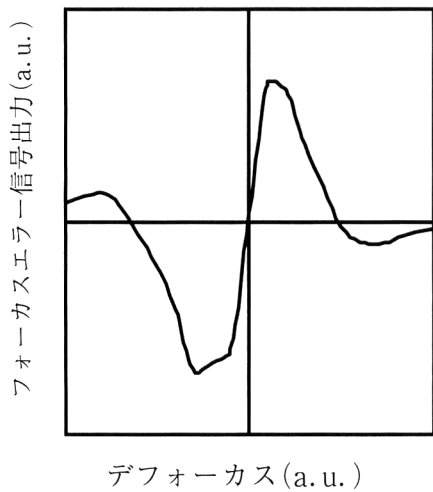


図7 回折計算によるフォーカスエラー信号。

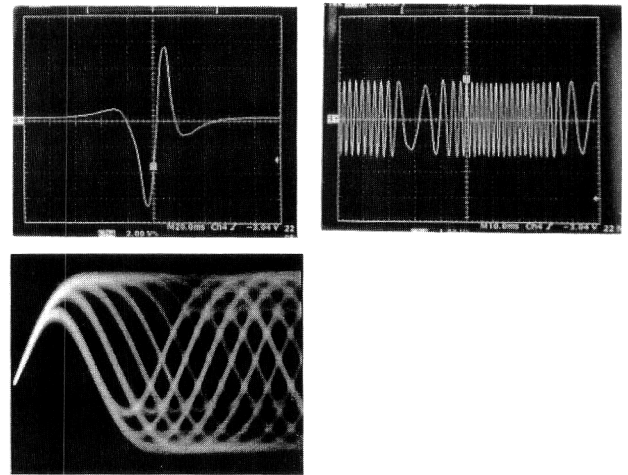


図8 フォーカスエラー，トラッキングエラー，イコライズ前の光磁気 RF 信号。

ベクトルの振幅の透過，反射前後での変化を計算している。多層膜による透過率・反射率の計算式は，マクスウェル方程式によって与えられる電磁場の境界条件に忠実に求めている。

今回の場合，1回の屈折と2回の反射によって，PD “I” “J” 付近には8つのスポットが存在しうするため，各光路ごとに，収差，透過率を考慮しながら，8つのスポットの光強度分布を計算した。その結果をPDパターンと重ね書きしたのが図6(c)である。図6(b)におけるスポットダイアグラムと比較すると，受光面上におけるスポットの数が6つ（実は8つ）から2つに減ったかのように見えると思う。マイクロプリズムの結晶軸の方向およびハーフミラー膜の特性を最適化することによって，反射時の光線分離を極力低減し，ディスクからの戻り光を受光面上で等しい強度をもった2つのスポットだけにはっきりと分けることができていることが確認できよう。今回筆者らはこれらの結晶内光線追跡・回折計算手法を用いてプリズム形状・PDパターン

等を決定し，実験によってその妥当性を検証した。一例として，本手法を用いて計算したフォーカスエラー信号を図7に示す。実験による妥当性の検証は，次章に示す。

4. 光学ヘッドの各種動作特性

MDLCを搭載した光学ヘッドを用いて行った実験結果をいくつか紹介する。

4.1 再生信号特性

図8は3つの基本的な再生信号，フォーカスエラー信号，トラッキングエラー信号，光磁気ディスクのイコライズ前のRF信号を示している。良好な信号波形が得られており，PD配置，パターンニングの設計に問題がないことがわかる。

図9は，MDLCを搭載した光学ヘッドによるデフォーカス特性を示している。MDシステムではデータ信号とADIP信号の2つを正確に再生する必要があり，BLER (block error rate: データ信号のエラーレート)，ATER

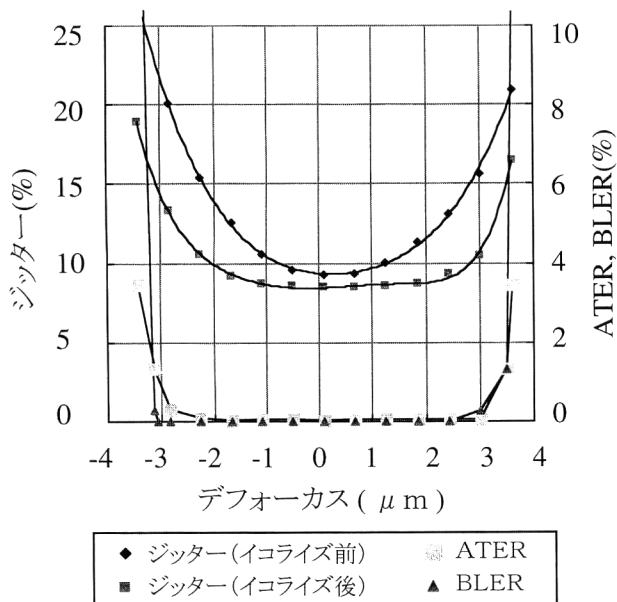


図9 ジッター, BLER, ATER のデフォーカス特性.

(ADIP 信号のエラーレート) のデフォーカストレランスが特性評価として重要視されている。CD に比べて、書き換え可能 MD (光磁気グループディスク) は光学ヘッドを構成する各種光学部品の特性 (収差, 膜特性, LD 特性等) ばらつきによる各種トレランスへの影響が大きく, 特にデフォーカストレランスは敏感である。

測定条件は次のとおりである。

[光学系] 波長: 785 nm, 開口数: 0.45

[ディスク] 線速度: 1.4 m/s, 検出窓幅: 231.5 ns, 基板材料: ポリカーボネート

現行ディスクリット光学系と比較しても, 同等以上の十分なトレランスとなっている。

4.2 耐冷熱衝撃特性

図 10 は, MDLC を搭載した光学ヘッドによるデフォーカス特性の冷熱衝撃試験結果を示している。特に車載用途では, 厳しい環境下での使用が考えられるため, 通常, 冷熱衝撃による特性変化を信頼性評価のひとつの基準として用いている。ここでは冷熱衝撃試験として 1 サイクル 1 時間で, 高温状態 (+80°C) と低温状態 (-40°C) を繰り返して 500 サイクル遷移させ, 前後の特性変化を調べた。その結果, 図から明らかなように, ほとんどジッター値, フォーカス最良点の変化がおこっておらず, 高い信頼性が実現されていることがわかる。これは LD, PD, ビームスプリッター間の位置ずれが生じにくい構造による効果であると考えられる。

以上により,

- (1) 小型・薄型, 低コストが期待できる形状

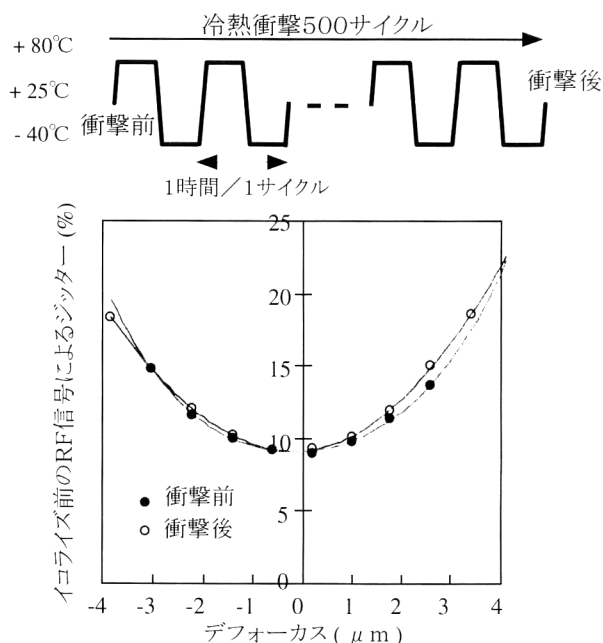


図 10 ジッターデフォーカス特性の冷熱衝撃による変化.

- (2) 実用上十分な光学特性

- (3) 高信頼性

の実現が確認されたといえる。

今回, 結晶内における光線追跡・回折計算技術の開発, その適用による KTP 結晶マイクロプリズム化によって, CDLC と同じ単純な形状を保ちつつ, 光磁気信号録再機能, サーボ信号検出機能等, MD 用光学ヘッドに必要なすべての機能を集積化した新しい光学素子 MDLC を開発した。集積化による光学部品点数の大幅削減や調整箇所を減少によって, 現行ディスクリット光学系に比べて大幅なコストの低減が期待される。また, MDLC を搭載した光学ヘッドが, MD 用光学ヘッドの重要特性であるデフォーカストレランスにおいて実用上十分な特性を有することを動作特性実験によって, 高い信頼性を有することを冷熱衝撃試験によって確認した。以上により, 複屈折結晶を用いた本方式が MD 用光学ヘッドとして十分なポテンシャルをもつことが示された。

文 献

- 1) N. Nishi, K. Toyota, K. Okamatsu, K. Saito, K. Horie, K. Tanaka and K. Nemoto: "Integrated optical device—MiniDisc laser coupler," 1998 Technical Digest Series Volume 8 of Optical Data Storage '98 (Optical Society of America, 1998) pp. 52-54.
- 2) N. Nishi, K. Toyota and K. Saito: "A method to design an integrated MO head using a diffraction calculation in bi-

- axial crystals," *Technical Digest of Magneto-Optical Recording International Symposium '99* (Magnetics Society of Japan, 1999), to be published.
- 3) 松本芳幸, 山本悦文, 谷口 正, 前田浩一, 久米英廣, 松田修, 秦 郁朗: "CD用集積型レーザーカプラーピックアップの光学的特徴", *SRF '96 Proceedings of the 6th Sony Research Forum* (1997) pp. 541-546.
 - 4) 竹内繁騎, 古賀稔浩, 堀之内昇吾: "光磁気用集積光ピックアップ(ミニディスク用光ピックアップへの展開)", 応用磁気学会第98回研究会 (1997) pp. 67-72.
 - 5) A. Arai, T. Hayashi, T. Nakamura, T. Nagata, M. Takashima, H. Aikoh, H. Tomita, H. Nakanishi, S. Ijima and A. Yoshikawa: "Integrated optical head with new one-beam tracking detection for magneto-optical disc," *Technical Digest of Joint Magneto-Optical Recording International Symposium/International Symposium on Optical Memory '97* (1997) pp. 202-203.
 - 6) K. Minami, H. Yamamoto, A. Yoshimoto, Y. Yoshida and Y. Kurata: "Optical waveguide device for a magneto optical disk head," *J. Magn. Soc. Jpn.*, **22**, Suppl. S2 (1998) 163-166.
 - 7) 早水良定: "逐次近似による二軸結晶内の光線追跡法", *光学*, **23** (1994) 431-438.
 - 8) Q.-T. Liang: "Simple ray tracing formulas for uniaxial optical crystals," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1008-1010.
 - 9) 小川智哉: 応用物理学選書1 結晶物理工学 (裳華房, 1987) pp. 59-79.

(1998年10月2日受理)