

## ■8群 (情報入出力・記録装置と電源) - 2編 (情報ストレージ)

### 3章 光ディスク

(執筆著者: 宮本治一) [2011年2月 受領]

#### ■概要■

光ディスクは、媒体可換 (リムーバブル) でかつ媒体製造時に情報の大量複製が容易であることから、デジタルデータストレージのみならず、CD、DVD、Blu-ray (BD) で代表されるように映像などマルチメディアコンテンツ頒布媒体とし広く活用されている。光ディスクの読み書きは集光する光を用いて媒体には非接触で行われるため、本質的に高信頼であり、情報の長期保存が可能である。このため、近年大規模データセンタでの電力消費のなど、情報記録にかかるエネルギーの問題が注目されるに至り、媒体のみをオフラインで長期保存可能という特徴を活かしたアーカイブ媒体としても今後の発展が期待されている。

光ディスクは可換媒体であるが故に互換性を確保するための「規格」(フォーマット) が不可欠であるが、一旦規格が決まると互換性のない新規技術の導入は制限される。このため、高密度・大容量化技術は、「新規格」とともに導入され、3~7年の周期で5倍程度の大容量化がなされて段階的に発展してきた。光ディスクの高密度化の王道は、光ディスク上に集光されるスポットの径をできる限り小さくすることであり、過去、光源波長の短波長化とレンズの開口数の拡大により、スポット微小化を達成してきた。しかし、ここに来て光の波長が可視光最短の400nmに達し、開口数も限界に近づいてきたため、今後は多層記録やホログラムなどの3次元記録が発展の主流となると考えられる。

本章では、これまでの規格の概要、及び記録再生や装置・媒体の仕様などを概説するとともに、最新の将来技術動向を紹介する。

#### 【本章の構成】

3-1節「光ディスクの特徴と原理」では、可換媒体としての光ディスクの特徴である規格(フォーマット)の概要と記録再生原理について概説する。3-2節「光ディスク装置」では、光ディスクドライブ及びその主要部品である光ピックアップの構造や動作原理を解説する。3-3節「光ディスク媒体」では、媒体材料・構造・設計指針や将来への拡張性を議論し、3-4節「将来技術」で更なる大容量化に向けて提案・研究・開発されている最新技術動向を紹介する。

## ■8 群-2 編-3 章

### 3-1 光ディスク

(執筆著者：川久保 伸) [2009年9月 受領]

記録メディアの中でも、特に光ディスクはリムーバブルという特徴を活かして、大量に普及している。リムーバブルメディアは、音楽、映画、ゲームなどのコンテンツの配信に最適であるのみならず、ユーザが大容量データを記録して持ち運ぶことができるというメリットもある。本項では、この光ディスクの特徴と原理について述べる。はじめに光ディスクの特徴について概説する。次いで記録再生原理を概観し、それを踏まえたうえで CD、DVD、Blu-ray Disc といった各規格の特徴について述べる。最後に、各種光ディスクの構造と記録材料についても簡単にふれる。

#### 3-1-1 光ディスクの特徴

光ディスクの主な特徴は、以下のとおりである。

- (1) 再生専用メディアとして安価に大量複製が可能である。
- (2) 大容量でリムーバブルな記録メディアである。
- (3) 非接触であるため、ごみ傷に強く保存安定性も高い。

CD、DVD は、ゲームソフトやデジタル化された音楽及び映像の標準的な配信用メディアとして用いられているが、これは特徴(1)によるところが大きい。これら両規格では再生専用規格に引き続き、ユーザデータを書き込むことのできる、記録型ディスクの規格 (CD-R、CD-RW/DVD±R、DVD±RW、DVD-RAM) が制定された。これらの規格に対応した小型の記録再生装置 (ドライブ) は、現在ではノートパソコンに標準装備されている。記録型ディスクは、ユーザが大容量データを入れて持ち運べる利便性、すなわち特徴(2)から、現在もその市場を拡大している。長期保存したい大切なコンテンツは、例え一時的に HDD などに蓄積することがあっても、最終的には光ディスクに移してアーカイブするのが一般的となっているが、これは光ディスクの特徴(3)によっている。

2000年代に入り、衛星放送や地上波放送のデジタル化・高品位化が進む中で、ハイビジョンコンテンツに対応した、CD、DVD に次ぐ3世代目の光ディスク規格が必要になった。そのような背景の下で制定されたのが Blu-ray Disc (BD) 規格であり、2003年には書換え型の Blu-ray Disc (BD-RE) とドライブが、次いで2006年には Blu-ray Disc (BD-ROM) を用いたムービーとプレーヤが市場導入された。図 3・1 に光ディスクの各規格をまとめた。

再生専用型	追記型	書換型
 CD(-DA), CD-ROM  CD-R 有機色素	 CD-RW 相変化	 DVD-video, DVD-ROM  DVD-R, +R 有機色素
 DVD-RW, +RW, -RAM  BD-ROM	 BD-R 無機材料	 BD-RE

図 3・1 光ディスクの規格一覧表

### 3-1-2 光ディスクの記録再生原理

図3・2に光ディスクの記録再生に用いられる光学系の模式図を示す。再生専用型、追記型、書換え型ともに、同一の光学系で扱うことができる。光学系の基本的な構成要素は、LD (Laser Diode)、対物レンズ、そして光検出器 (Photo Detector, Photo Diode IC) である。再生専用ディスクでは、ピットと呼ばれる微小な凹凸として情報が記録されている。再生時には光スポットがこの凹凸によって回折され、受光素子上で戻り光の強弱として信号が検出される。記録型ディスクへの情報記録時には、レーザの熱エネルギーで記録材料を局部的に加熱して、光学特性を変化させる。記録されたユーザデータは一般に凹凸ではなく、光の反射率や位相に作用する微小領域になる。



図3・2 光ディスクの光学系

対物レンズによって集束された光スポットの直径  $d$  は、光源の波長  $\lambda$  とレンズの開口数  $NA$  を用いて、 $d \approx 1.22 \times \lambda / NA$  と表される (図3・3)。したがって、情報の面密度は  $(NA/\lambda)^2$  に比例することになる。このように、光の局在化の程度によって情報の記録密度が左右されるので、集束された光スポットを微細化することが、光ディスク高密度化の基本である。これは光源の波長を短く、また対物レンズの  $NA$  を大きくすることに対応する。

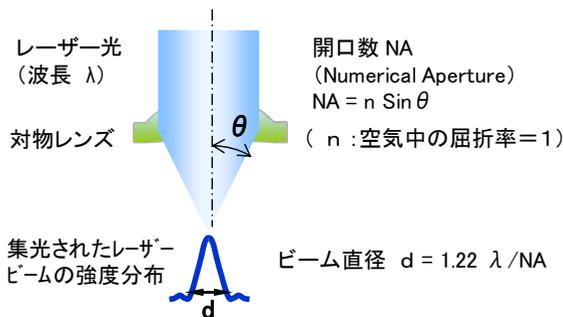


図3・3 レーザスポット

### 3-1-3 光ディスクの記録再生原理と規格の関係

光ディスク規格の進化にともない、記録密度を上げるために、光スポットの微細化が進んだ。スポットの微細化が進む一方で、光学収差（結像性能の劣化）が発生し易くなる。ここで、スポット径  $\propto \lambda/NA$  であるとき、焦点深度  $\propto \lambda/(NA)^2$ 、コマ収差  $\propto t \cdot (NA)^3/\lambda$ 、球面収差  $\propto \Delta t \cdot (NA)^4/\lambda$  となる（図 3-4 参照）。

ここで、 $t$  はディスクの光透過層厚み、 $\Delta t$  はその厚み誤差である。スポットの微細化とともに焦点深度が減少し、それによって光学収差が発生し易くなることが分かる。コマ収差はディスクの傾きによって発生し、光透過層の厚みに比例する。球面収差は光透過層の厚み誤差に比例して増加する。このことから、 $\lambda$  と  $NA$  が変化しても収差発生量をほぼ一定に保つためには、光透過層（透明基板）の厚み  $t$  や、厚み誤差  $\Delta t$  を一定値以下に抑える必要性のあることが理解できる。

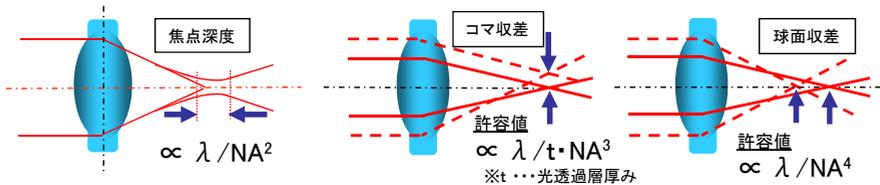


図 3-4 焦点深度と収差

図 3-5 に各規格におけるディスク構造をまとめた。Blu-ray Disc では光透過層の厚みは 0.1 mm と定められており、カバー層と呼ばれている。BD ではこのカバー層を介して記録再生するので、405 nm という短波長レーザと 0.85 という大きな NA の対物レンズを用いても、光学収差を小さく抑えることができている。

	CD	DVD	BD
ディスクの厚み	1.2 mm	1.2 mm	1.2 mm
光透過層の厚み	1.2 mm	0.6 mm	0.1 mm
対物レンズの NA	0.45	0.6	0.85
光源波長 (λ)	780 nm	650 nm	405 nm
面密度 (NA/λ) <sup>2</sup>	1 (基準とする)	≒ 2.6	≒ 13.6
トラックピッチ	1.6 μm	0.74 μm	0.32 μm
線記録密度	0.59 μm / bit	0.27 μm / bit	0.12 μm / bit

図 3-5 光ディスクの規格と構造

CD, DVD, BD 間の記録密度を比較するため、各規格の再生専用ディスクのピット SEM 像を図 3-6 に示す。

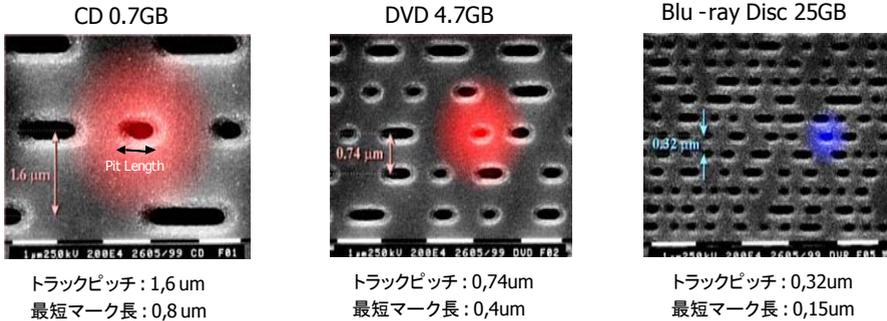


図 3・6 CD, DVD, BD の面記録密度比較

### 3-1-4 光ディスクの種類、構造と材料

再生専用型ディスクと記録可能型ディスクの構造的な違いを図 3・7 に示す。再生専用型、記録可能型 (=追記型+書換え型)、ともに基本構造は「基板+積層薄膜+保護層」となっている。基板はポリカーボネート樹脂を材料としており、CD は 1.2 mm, DVD は 0.6 mm (貼り合わせて 1.2 mm), BD は 1.1 mm の板厚である。

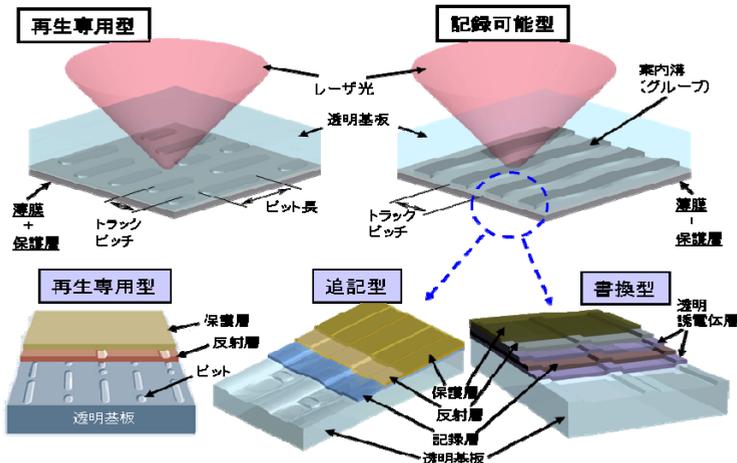


図 3・7 光ディスクの種類

基板表面には、再生専用型では情報信号に応じて長さが変調された窪み（ピット）が、記録可能型ではレーザー光のトラッキングを制御するための案内溝（グループ）が、それぞれ形成されている。CD や DVD は透明基板を介してレーザー光が照射されるが、BD では基板とは反対側の光透過層（図では保護層に相当）側から照射される（3-1-3 項「光ディスクの記録再生原理と規格の関係」参照）。そのため BD 用の基板は必ずしも透明である必要がない。

保護層は紫外線硬化樹脂と呼ばれるもので形成され、厚さは  $10\ \mu\text{m}$  程度である。CD ではこの上にスクリーン印刷などが施され、レーベル面となる。DVD では 0.6 mm 基板の貼合せ

構造のため、接着層が保護層を兼ねる。BD では前述のとおりこれが光透過層となり、単層ディスクの場合は厚さ 0.1 mm (100  $\mu$ m) で均一に形成される。「薄膜」は再生専用型の場合、光を反射するための反射層 (Al 合金や Ag 合金など) のみである。

記録可能型は追記型及び書換え型の 2 種類あり、最も単純な構造を考えると追記型は 2 層 (記録層+反射層)、書換え型は 4 層 (誘電体層+記録層+誘電体層+反射層) となる。

CD, DVD の追記型ディスクには記録材料として有機色素が用いられている。有機色素は記録前後で光の位相に与える影響が変化する。BD の場合には、多様な記録原理に応じて無機材料が広く用いられているが、有機色素タイプも実用化されている。書換え型ディスクの記録材料は、CD, DVD, BD すべてに相変化材料が用いられている。相変化記録材料では、記録前の結晶と記録後の非晶質の間で反射率が異なることを利用して信号の再生を行う。

以上の理由により、すべての種類のディスクに、同一の光学系で対応することができる。

## ■8 群-2 編-3 章

### 3-2 光ディスク装置

(執筆著：日野泰守) [2010年3月 受領]

12 cm サイズの CD からスタートしたデジタル記録方式の光ディスクは、レーザ波長の短波長化とレンズ開口数 (NA) の向上によって、同一のディスク形状で DVD から Blu-ray にその記録容量を約 73 倍に向上させるとともに、オーディオから映像、データ応用、更にはハイビジョン映像まで応用範囲を大きく広げてきた。また、MO や MD、UMD などの様々なサイズの光ディスク装置も誕生している。この光ディスクの進化の中で、特に 12 cm 系の光ディスク (CD, DVD, Blu-ray) をサポートする装置は、CD から Blu-ray の進化の過程で誕生した多くのフォーマットと、異なる記録材料の多くの光ディスクに対して記録再生を実現し、下位互換を保ちながら、今なお進化を続けている。

この光ディスク装置を支える技術としては、ディスクに光ビームを照射して記録再生を行う光ピックアップの技術、光ビームのフォーカス・トラッキング・アクセス位置制御を行う制御技術、フォーマットに準拠した記録信号を生成しレーザを変調して記録を行う記録技術、記録された信号の再生を行う信号再生技術、記録データの信頼性を保つためにエラー訂正を行うエラー訂正技術、記録再生データのホスト転送などを行うインタフェース技術に大きく分かれる。以下、これらの光ディスクを支える技術について説明する。

#### 3-2-1 光ディスク装置の全体構成

図 3・8 に光ディスク装置の全体構成を示す。ホスト IF から転送された記録データは、誤り符号化をされた後、記録処理部で変調処理と記録パルス用のパルスの生成が行われて、この記録パルスに応じてレーザを照射することで光ディスクに記録される。記録されたデータは、光ピックアップで再生され、再生信号処理で 2 値化、データの同期処理が行われた後に誤り訂正によってエラー修正され、ホスト IF を通じてホストに転送をされる。この際のディスク上の記録再生の位置は、制御系によってコントロールされる。

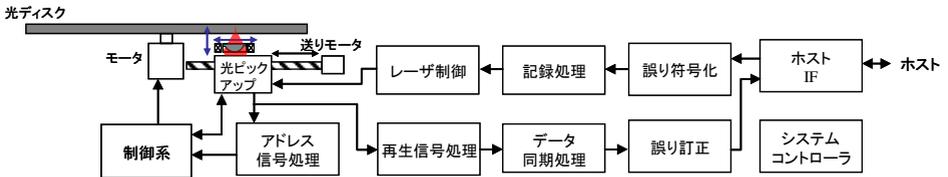


図 3・8 光ディスク装置全体構成

#### 3-2-2 光ピックアップ

##### (1) 全体構成

図 3・9 に光ピックアップの一般的な構成図を示す。レーザから出射された光は、偏光ビームスプリッタで反射され、コリメータレンズで平行光となり、 $\lambda/4$  波長板で円偏光に変換、アクチュエータに搭載された対物レンズによって、光ディスク盤面上に集光される。集光さ

れた光は、光ディスク盤面上で反射する際に盤面上の記録マークの情報に応じて強度変調された反射光となる。この反射光は、再び $\lambda/4$ 板を通過することで偏光面が往路と直線な直線偏光に変換され、コリメータを通過した後に偏光ビームスプリッター入る。反射光の偏光面は往路と垂直なために偏光ビームスプリッターをそのまま通過して、検出レンズを通過して光検出器に至り、光信号から電気信号に変換される。

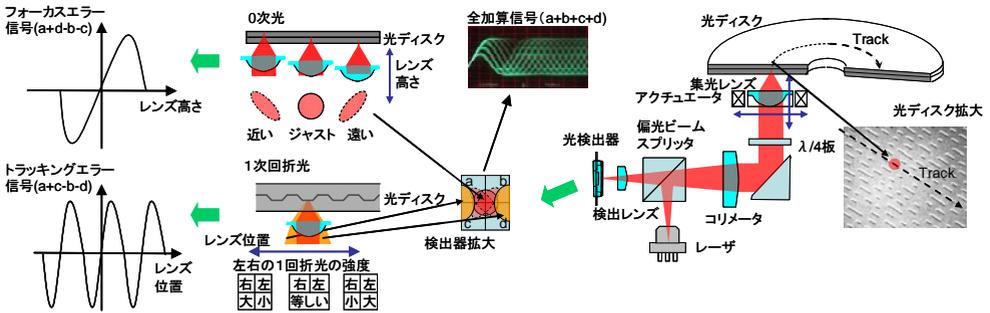


図 3・9 光ピックアップ

## (2) 再生信号，制御信号検出方法

光検出器は図 3・9 に示したように、4 分割の光センサ (a, b, c, d) に分かれており、センサの出力をすべて加算すると、反射光の強弱信号となり記録マークからの信号 (全加算信号) を検出できる。この信号を復号することで、光ディスクに記録されたデータが再生される。しかし、この再生信号を安定に検出するためには、光ディスク上のトラックに光ビームを精度良く集光する必要があるが、光ディスクは形状の変動が大きいため光ビームのフォーカス位置とトラッキング位置を電気的に制御する必要が生じる。

フォーカス制御を行うには、集光レンズのフォーカス状態を検出する制御信号 (フォーカスエラー信号) が必要で、代表的な検出方法として非点収差方がある。また、トラッキング状態を検出する制御信号 (トラッキングエラー信号) も同時に必要で、代表的な方法としてはプッシュプル法がある。フォーカスエラー信号は、検出器状で 4 分割された検出信号に対して、 $a+d-b-c$  の演算処理を行うことで、トラッキングエラー信号は、 $a+c-b-d$  の演算を行うことで簡単に得られる。この検出方法以外にも多くの方法が考案されているので、詳細については参考文献 1) を参照されたい。

### 3-2-3 フォーカス・トラッキング・アクセス制御技術

光ディスクへの記録再生を行うためには、光ピックアップで検出された制御信号に基づいて集光レンズの位置を制御して安定な集光状態を保ちつつ、光ビームを光ディスク上の任意の位置に安定に移動させる仕組みが必要となる。図 3・10(c) に、一般的な光ディスク制御系の構成図を示す。

光ピックアップは、送りモータによる移送系によってディスク上の任意の半径位置に移動される。この際のディスク上の位置の識別には、光ディスク上の記録データ中に付加されて

いるアドレス情報や光ディスクのトラック溝に変調されて付加されているアドレス情報が用いられる。更に、光ビームを光ディスク上のトラックに安定に集光させるために、光ピックアップから検出されたフォーカスエラー信号とトラッキングエラー信号を用いて集光レンズの精密な位置制御が行われる。このとき、集光レンズを高速に移動させる素子が、アクチュエータである（図 3・10 (b) 参照）。

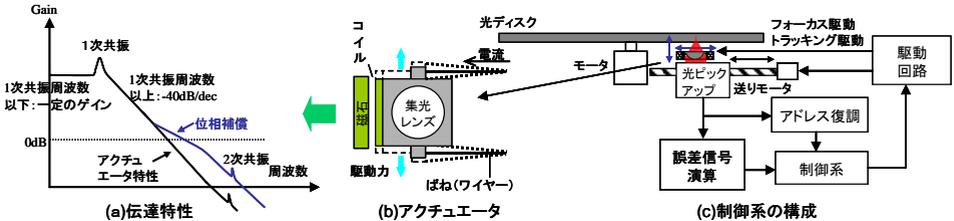


図 3・10 光ディスク装置制御系

アクチュエータは、集光レンズを保持するホルダをバネで保持した構造で構成されており、磁石と対向した位置にあるホルダ上のコイルに電流を流すことで集光レンズを高さ方向と半径方向の 2 軸に独立に移動させることができる。アクチュエータの伝達特性は、バネの剛性と可動部の重さによって決まる 1 次共振周波数をもった特性となり、コイルを流れる電流の周波数がこの 1 次共振周波数を超えるとレンズの移動量は周波数の 2 乗に比例して減少し位相も 180 度遅れる。このような位相遅れがある制御対象物を安定に位置制御をするためには、制御系のゲインが 0 dB となるゲイン交点付近で、位相遅れを電氣的に補償する位相補償制御が必要となる。

図 3・10(a)に、一般的なフォーカス・トラッキング制御系のループゲイン特性を示す。図 3・10(a)に示すように、アクチュエータの特性を電氣的にある周波数以上で位相補償することで、ゲイン交点付近ではゲイン特性が  $-20 \text{ dB/dec}$  (周波数に比例) に近い特性となる。この制御系の制御誤差はディスクの変動量をゲインで割った値となるが、光ディスク装置は制御誤差を記録再生に影響を与えない程度まで小さくする必要がある。光ディスクのフォーカス・トラッキング制御系のゲイン特性は、アクチュエータの特性を反映して 1 次共振点以上の高い周波数では、制御ゲインが低下する特性となる。しかしながら、光ディスクがもつディスク面の変動要因もディスク回転数以上の周波数成分は急激に減少するために、このような制御特性でも問題なく安定な制御が実現できる。これらの制御方法の詳細については、参考文献 2) を参照されたい。

### 3-2-4 記録技術

光ディスクには、レーザ光を強度変調して照射することで記録膜に熱変化を起こし記録マークを形成することでデータの記録が行われる。この記録マークの記録技術について、図 3・11 を用いて説明する。

記録データは、まず 1 と 0 の連続出現数を制限 (ランレングス制限) するとともに、データ列の DC 成分を抑圧 (DC フリー化) する変調処理が施される。代表的な変調符号として、DVD で用いられている 8/16 変調や Blu-ray で用いられている 1-7 PP 変調がある。この変調処

理には、1の連続数や0の連続数を制限してフォーカス・トラッキングなどの制御に必要な信号帯域と記録データの帯域を分離する役割、再生に必要な再生クロックを抽出するために定期的にデータ変化点を付加する役割、最大マーク長と最小マーク長の比率を一定以下に制限することでマーク幅の均一な記録マークの形成を容易にする役割がある。

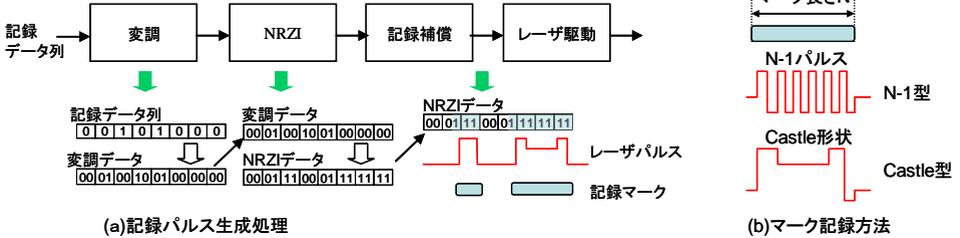


図 3・11 光ディスク記録方法

この変調処理後に更に1のデータ部で出力が反転するNRZI変調され、データの1に対応する部分が記録マークとして記録される。この記録マークはレーザをパルス状に照射することで形成されるが、このパルスには記録マークの長さや記録マークの前後スペースの長さによる熱的な干渉を補正するためにパルスの開始・終了位置を微妙にコントロールする記録補償処理が施される。また、記録マークの幅を均一に記録するために、レーザパルス形状が工夫されており、代表的な記録方法としてN-1型、Castle型と呼ばれる記録方法がある(図3・11(b))。

N-1型は、長さNのマークを記録する際にN-1個のパルスで記録マークを形成する方法で、主にリライタブル型の光ディスクに用いられる。Castle型は、マークの記録開始部分と終了部分の記録パワー高くして記録する方法でライトワンス型の光ディスクに用いられる。

3-2-5 再生技術

図3・12にCD、DVD、Blu-rayにいたるまでの記録容量の推移と、その再生信号であるアイパターンを示す。アイパターンとは再生信号を重ね書きしたもので、再生信号の分別の状態を表す。記録密度の向上にともなって、1ビット当たりの記録マークが短くなっており、再生信号の最短マーク振幅が低下している。

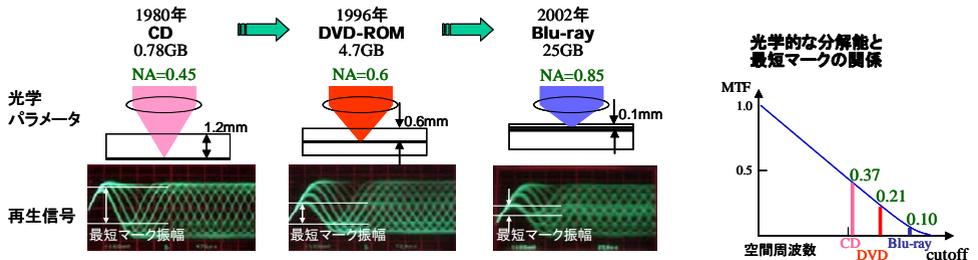


図 3・12 光ディスクの再生信号

図 3・12 の右図に集光ビームの光学的な分解能と記録されている最短マークの関係を示す。Blu-ray における最短の記録マークは、光学的に分別が可能な光学分解能限界の 80 % まで近づいており、再生信号の振幅の低下が起きるとともに記録マーク間の再生時の干渉が増大するために再生される信号の分別がより難しくなる。

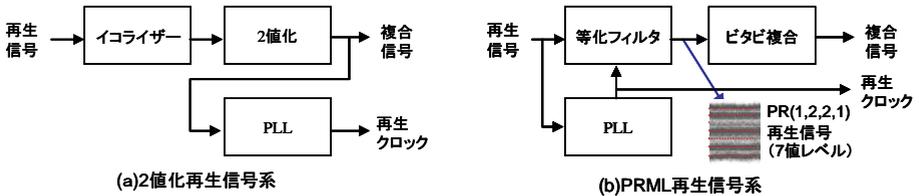


図 3・13 光ディスクの再生系

図 3・13(a)に CD や DVD で用いられているデータの復調方式の構成図を示す。CD や DVD では、再生時の符号間の干渉を除去するイコライザを通した後に再生信号を 2 値化処理によって復号する方法が一般的に用いられており、2 値化した信号から PLL (Phase Lock Loop) によって再生クロックを抽出して、このクロックをもとに記録データの復号がなされる。

これに対して、Blu-ray では光学的な分解能が低下し分別が困難となった再生信号を復号する必要があるために、PRML (Partial Response Maximum Likelihood) と呼ばれる信号処理の方法が一般的に用いられている。PRML とは、符号間干渉が一定量存在することを前提に再生を行う PR (Partial Response) 技術と、再生信号中から最も確からしい信号系列を選択復号する最尤復号 (Maximum Likelihood) 技術の組合せによる復号技術である。PR を前提とした再生信号は、符号間干渉が一定量存在することを前提に再生を行うために再生信号には、多値のレベルが出現する。例えば、Blu-ray で用いられる PR (1, 2, 2, 1) の再生系では、4 ビットのビット列が 1 : 2 : 2 : 1 の比率で干渉するために、7 値の再生レベルが出現する。

図 3・13(b)に PRML 再生系の一般的な構成図を示す。再生信号から PLL によって生成されたクロックに基づいて処理される点は、DVD、CD と同じであるが、再生信号は等化フィルタによって一定量の符号間干渉をもった多値レベルの信号に等化された後に、ビタビ復合によって復号される。ビタビ復号とは、多値レベルに別れた再生信号に最も近い 2 値化データを復調する最尤復号アルゴリズムで、これらの詳細については参考文献 3) を参照されたい。

### 3-2-6 エラー訂正技術

光ディスク上に記録されたデータは、ディスク上の傷や指紋などの記録媒体の劣化に対して記録のデータの再生信頼性を高めるために、エラー訂正の技術が導入されている。図 3・13 に示したように、光ディスクの高密度化にともなって集光レンズの NA が向上しており、ディスクの傾きに対する再生信号の劣化を防ぐために CD で 1.2 mm だった光投入面から記録層までの厚さ (カバー層厚) が、Blu-ray では 0.1 mm まで減少している。カバー層の厚さが薄いほど、光ディスク面上のゴミや傷に対する再生信号への影響は大きくなるので、エラー訂正の単位を大きくすることでエラー訂正能力を向上させて、光ディスクの再生信頼性を維持している。

データ用 CD では、エラー訂正のサイズが 2 kB であったのに対して DVD では 32 kB、Blu-ray

では 64 kB に増加している。DVD では、リードソロモン符号 (RS 符号) によるパリティが横方向 (ディスク走行方向) に 10 バイト、縦方向に 16 バイト付加された構造のエラー訂正符号が用いられている。また、Blu-ray では 32 バイトのパリティを縦方向に付加した RS 符号が用いられており、エラー位置を特定するためのピケットコードがエラー訂正ブロック内に配置されている。これによってバーストエラーに対する訂正能力が向上している。また、エラー訂正加えて、記録したブロックをベリファイし、エラーが発生したブロックに対しては自動的に光ディスクの別の領域に再記録する交替処理によって、より高い記録再生の信頼性を実現されている。

### 3-2-7 インタフェース技術

光ディスクとのデータのやり取りは、多くの光ディスク装置で ATAPI や SATA などの一般的なインタフェースが用いられている。光ディスクドライブの動作を規定するコマンド群は、MMC (Multi Media Command Set) として、ANSI で規格化されており、詳細については参考文献 4) を参照されたい。

#### ■参考文献

- 1) 尾上守夫, “光ディスク技術,” ラジオ技術社, pp.79-98, 1989.
- 2) 徳丸春樹, 横川文彦, 入江 満, “DVD 読本,” オーム社, pp.56-63, 2003.
- 3) 小川博司, 田中伸一, “ブルーレイディスク読本,” オーム社, pp.136-154, 2006.
- 4) <http://www.t10.org/cgi-bin/ac.pl?t=f&f=mmc6r00.pdf>

## ■8群-2編-3章

### 3-3 光ディスク媒体

(執筆者：菊川 隆) [2009年3月 受領]

一般的に広く流通している光ディスク媒体として Compact Disc (CD), Digital Versatile Disc (DVD), Blu-ray Disc (BD) があげられる。本節では、各タイプのメディアに共通する技術以外については、現状の最新技術である BD の技術を中心に述べることにする。

具体的には本節では、媒体構成、基板・カバー層、記録膜材料、多層化技術について、その詳細を説明する。

#### 3-3-1 媒体構成 (Structure)

光ディスク媒体は、再生専用型は光入射面側から、基板/反射膜 (CD), 基板/反射膜/接着層/ダミー基板 (DVD), カバー層/反射膜/基板 (BD) という構成をしている。1回だけ記録できる追記型媒体 (CD-R, DVD-R, BD-R LTH) については、再生専用型の構成における基板と反射膜の間に有機色素からなる記録膜が設けられている。また、多数回の書換えができる書換え型媒体である CD-RW, DVD+/-RW, DVD-RAM, BD-RE や1回だけ記録できる BD の追記型媒体 BD-R は、有機色素からなる記録膜ではなく無機材料による記録膜を使用し、再生専用型における反射膜が、第一誘電体膜/記録膜/第二誘電体膜/反射膜に置き換わった構成をとることが基本である。

再生専用型では情報は基板に窪み (ピット) の形で埋め込まれており、読取りレーザ光は基板と反射膜との界面で反射し、ピット深さで表される位相差を利用することによって再生信号が得られる。追記型、書換え型では基板にはレーザ光をガイドする溝 (グループ) が設けられており、レーザ光をある値以上の強度で発光させ、温度により記録層の物理・化学的性質を変化させることによって信号に相当する記録マークを形成し、記録部分と未記録部分の光学的性質 (反射率) の差を用いて再生信号としている。

CD では基板が約 1.2 mm 厚、DVD では基板とダミー基板が各々約 0.6 mm 厚、BD ではカバー層を約 0.1 mm 厚、基板を 1.1 mm 厚とすることによって、ユーザにとってはトータル 1.2 mm 厚かつ 120/80 mm 直径の光ディスクとして共通の使用感を与えている。

#### 3-3-2 基板、カバー層 (Substrate, Cover Layer)

CD, DVD では記録再生に使用されるレーザ光は、情報を保持している基板/反射膜界面 (再生専用型)・記録膜 (追記型・書換え型) に基板を通して到達するため、基板は、使用しているレーザ光の波長に対して、高い透明性をもつ必要がある。また、マスタスタンプに入れられた情報信号やドライブ制御信号を射出成型により正確に転写、安定に保持できる必要がある。以上の特性を低コストで実現するために、CD, DVD においては基板の材料としてポリカーボネートが使用されている。BD の基板は、前項で示したように、基板にはレーザ光が届く必要がないので、必ずしも使用しているレーザ光の波長に対して高い透明性をもつ必要はないが、上記した転写性・安定性とコストの観点から CD, DVD と同様に材料としてポリカーボネートが使用されている。

BD においては、光入射面側には 0.1 mm 厚のカバー層が設けられている。CD, DVD と比

べると、最表面層の厚みが薄くなったため (CD : 1.2 mm, DVD : 0.6 mm), 最表面におけるレーザ光のスポット径ははるかに小さくなり、最表面カバー層に付着する傷や指紋の影響が甚大になる。したがって、初期に市販された BD-RE 媒体は傷や指紋の付着のリスクを低減するために、カートリッジ内に納められていた。しかしながら、媒体コストやドライブのスリム化などの観点から、カートリッジなしのベア化が強く要望された経緯があり、傷や指紋の付着に対して強い耐性をもつ (傷や指紋が付着しにくい) ハードコートの開発がなされ、カバー層の表面にハードコートが付与されるようになった。具体的には、傷付着の耐性のために 10 nm 程度のコロイド状のシリカ粒子をハードコート材料に添加し<sup>1)</sup>、指紋付着の耐性のためには、特に油性成分の接触角に着目してハードコートの組成を最適化することにより<sup>2)</sup>、傷や指紋の付着に対して実用上十分な耐性を獲得するに至り、BD-R, RE のベア化が実現された。このハードコート技術は、DVD メディアに対しても展開されており、光メディア全体の利便性を向上させている。

### 3-3-3 記録膜材料 (Recording Materials)

本項では追記型・書換え型の記録膜について、追記型は BD-R 記録膜材料に絞って、書換え型は代表的な記録膜材料を紹介する。

BD-R の記録膜材料は、その記録メカニズムとして、2 層記録膜の相互拡散 (混合)、記録膜の相変化 (結晶化)、記録膜の酸化反応を利用するものが報告ないしは商品化されている。以下で述べる記録メカニズムはいずれも不可逆過程であるため、書換えが不能になっている。

混合メカニズムによって記録マークが形成される記録膜材料として Si/Cu の 2 層膜が報告されている<sup>3)</sup>。この記録膜では、記録マークを形成するために記録パワーが照射された領域では、熱に誘起されて Si と Cu の相互拡散が起こり Si+Cu の 1 層になる。未記録部は Si/Cu の 2 層のまま、Si+Cu の 1 層部 (記録マーク部) と Si/Cu の 2 層部 (未記録部) の光学定数の違いによって再生信号が得られることになる。結晶化メカニズムによって記録マークが形成される記録膜材料として Te-Pd-O 材料が報告されている<sup>4)</sup>。この記録膜では、未記録部は TeO<sub>2</sub> のマトリクス内に Te と Pd-Te 粒子が分散している非晶質であるが、記録マークを形成するために記録パワーが照射された領域では Te 粒子ないしは Pd-Te 粒子が粗大化して結晶化する。未記録部は非晶質のまま、結晶部 (記録マーク部) と非晶質部 (未記録部) の光学定数の違いによって再生信号が得られることになる。酸化メカニズムによって記録マークが形成される記録膜材料として SnO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 材料が報告されている<sup>5)</sup>。この SnO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 材料は Sn-O 系の化学量論組成に対して O poor な組成となっているため、記録マークを形成するために記録パワーが照射された領域では化学量論組成まで SnO<sub>2</sub> が酸化される。未記録部は O poor な非化学量論組成のまま、化学量論組成部 (記録マーク部) と非化学量論組成部 (未記録部) の光学定数の違いによって再生信号が得られることになる。なお、N の添加は、媒体ノイズ低減のために SnO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> 中の Sn 粒子を微細化させる目的であるとされている。

書換え型の記録膜では、記録パワーが照射された箇所は溶融しその後急冷されることにより非晶質部 (記録マーク) が形成され、それ以外の場所は消去パワー (<記録パワー) が照射されることにより、以前に記録された非晶質である記録マークが結晶化される、というメカニズムにより、ダイレクトオーバーライトが可能になっている。このメカニズムは CD-RW, DVD+/-RW, DVD-RAM, BD-RE のすべての書換え型に共通のメカニズムである。

上記のような記録消去メカニズムを実現するための材料として GeTe と Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 擬 2 元系 tie-line 上に存在する各種金属間化合物系材料<sup>6)</sup>(Sb を Bi に置換のケースもあり<sup>7)</sup>)と、Sb-Te 2 元系の共晶組成 Sb<sub>70</sub>Te<sub>30</sub> (mol %) 近辺の組成に数 mol % の Ge, Ag, In を添加したいわゆる共晶系材料<sup>8),9)</sup>が広く知られており、商品として実用化されている。金属間化合物系材料と共晶系材料の違いとしては、その非晶質結晶化メカニズム(記録マーク消去メカニズム)の違いが知られており、前者は核生成・成長型、後者は界面成長型という特徴をもっている<sup>9)</sup>。これらのメカニズムに基づき、光ディスクの特性的には、金属間化合物系材料では記録面に接触する界面材料の種類により結晶化速度の制御ができること<sup>10)</sup>、共晶系材料では主に Sb の量によって結晶化速度の制御ができること<sup>9)</sup>が特徴になる。各社の技術水準やターゲットとする製品のスペックにより、これらの 2 種類の材料が使い分けられているようである。

### 3-3-4 多層化技術 (Multi-layer Technology)

光ディスクの更なる大容量化を考えたときに、従来までのような短波長化、高開口数化の手法は限界に近づいてきていることから、光の直進性と焦点深度の選択性を利用した多層化技術は有望な技術であると考えられ、ほかの磁気ストレージや半導体ストレージにはない大きな特徴である。事実、2006 年に公開された International Symposium on Optical Memory (ISOM) による技術ロードマップ<sup>11)</sup>において、Solid Immersion Lens (SIL) や超解像を用いた次世代技術においても、サブテラバイトないしはテラバイト級の容量をもつ光ディスクを実現するためには多層化技術をプラスすることが必要、との認識が示されており、多層化技術は次世代光ディスク大容量化技術として、キーとなる技術であると考えられる。

多層型光媒体においては、光入射面側から最も遠い記録層においてもレーザ光が十分な強度をもつためには、入射面側から最も遠い層を除いて、記録層は高い透過率を有する必要がある。ここでは、 $n$  層の記録層をもつ場合、光入射面側から最も遠い層を  $L_0$  層、光入射面側に近づくにつれて順に  $L_1, L_2, \dots, L_{n-1}$  層と表すことにする。すべての層を積層した状態での  $L_k$  層の反射率を  $R_k$ 、単層の状態での  $L_k$  層の反射率と透過率を各々  $r_k, t_k$  とすると、 $R_k = (t_{k+1} \times t_{k+2} \times \dots \times t_{n-1})^2 \times r_k$  で表される。一般的にはすべての層の反射率が同一であることが望ましいので、各層の光学的特性は  $R_k = \text{const.}$  ( $k = 0, 1, \dots, n-1$ ) を満たすような  $r_k, t_k$  を有するように設計されなくてはならない。更に、記録型の多層型光媒体の場合は、光学的特性のみならず、実用的な記録パワーの照射によって記録マーク形成反応が起きる、といった熱的な特性をも満たす記録膜材料である必要がある。

このような光学特性と熱的特性を両立する追記型記録膜材料として、Bi-Ge-O<sup>12)</sup>、Te-Pd-O<sup>13)</sup>が報告されている。このうち、Bi-Ge-O は Bi-O 系の化学量論組成に対して O rich な組成となっているため、記録マークを形成するために記録パワーが照射された領域では化学量論組成まで Bi-O が還元される。未記録部は O rich な非化学量論組成のまま、化学量論組成部(記録マーク部)と非化学量論組成部(未記録部)の光学定数の違いによって再生信号が得られることになる。なお、Ge の添加は多層の各層の透過率の調整のために添加されており、Ge の添加量が多いほど透過率が高くなる。この Bi-Ge-O 材料を用いて 6 層までの多層化に成功しており、PRML 技術を用いて 33.3 GB×6 層 = 200 GB までのフィジビリティが確認されている。一方、Te-Pd-O 材料に関しては前項で紹介した記録メカニズムは共通で、やはり光学的な特性と熱的な特性を制御することにより 4 層までの多層化に成功しており、25 GB

×4層 = 100 GB までのフィジビリティが確認されている。

また、多層型光記録媒体では、各記録層の間の距離（中間層の膜厚）の制御も重要である。中間層の膜厚が  $10 \mu\text{m}$  以下になると、隣接した層から信号の漏れ込みによって再生層の特性の劣化が生じることが指摘されている<sup>14)</sup>。また、多重反射光による影響を軽減するためには、複数の中間層の膜厚はすべて異なることが望ましいとされている<sup>15)</sup>。したがって、何層までの多層化が可能か、というよく問われる問いに関しては、記録膜の透過率の設計もさることながら、最も奥の記録膜を最表面からどの位置に配置するか（チルトマージン）、最も手前の記録膜をどの位置に配置するか（媒体表面の異物耐性）の上下限内で、上述した中間層膜厚の条件で、どのように残りの記録膜を配置するか、という問題に帰着すると考えられる。

また、多層型光記録媒体では中間層の数が増えるので、中間層をどのように形成するかという中間層の製法が重要になってくることは言を待たない。現行の2層の製法と同様の製法で可能なのか、新たな製法を導入する必要があるのか、について現状では学会発表などでは報告がないが、多層化技術のキー技術の一つであることには間違いのないであろう。

#### ■参考文献

- 1) N. Hayashida, H. Hirata, T. Komaki, M. Usami, T. Ushida, H. Itoh, K. Yoneyama, and H. Utsunomiya, "High-Performance Hard Coat for Cartridge-Free Blu-ray Disc," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, 2B, pp.750-753, 2003.
- 2) N. Hayashida, H. Itoh, K. Yoneyama, T. Kato, K. Tanaka, and H. Utsunomiya, "Anti-fingerprint property of the hard-coat for cartridge-free Blu-ray disc," *Proc. SPIE*, vol.5069, pp.361-368, 2003.
- 3) H. Inoue, K. Mishima, M. Aoshima, H. Hirata, T.Kato, and H. Utsunomiya, "Inorganic Write-Once Disc for High Speed Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol.42, 2B, pp.1059-1061, 2003.
- 4) M. Uno, T. Akiyama, H. Kitaura, R. Kojima, K. Nishiuchi, and N. Yamada, "Dual-layer write-once media for 1x-4x speed recording based on Blu-ray Disc format," *Proc. SPIE*, vol.5069, pp.82-89, 2003.
- 5) K. Yasuda, J. Nakano, N. Mitsui, and S. Tamada, "An Inorganic WO Disc with Blu-ray Format," *Tech. Dig. Optical Data Storage*, pp.42-44, 2003.
- 6) N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi, N. Akahira, and M. Takao, "Rapid-phase transitions of GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory," *J. Appl. Phys.*, vol.69, 5, pp.2849-2856, 1991.
- 7) K. Yusu, S. Ashida, N. Nakamura, N. Oomachi, N. Morishita, A. Ogawa, and K. Ichihara, "Advanced Phase Change Media for Blue Laser Recording of 18 GB Capacity for 0.65 Numerical Aperture and 30 GB Capacity for 0.85 Numerical Aperture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.42, 2B, pp.858-862, 2003.
- 8) H. Iwasaki, Y. Ide, M. Harigaya, Y. Kageyama, and I. Fujimura, "Completely Erasable Phase Change Optical Disc," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.31, 2B, pp.461-465, 1992.
- 9) H. J. Borg, M. van Schijndel, J. C. N. Rijpers, M. H. R. Lankhorst, G. Zhou, M. J. Dekker, I. P. D. Ubbens, and M. Kuijper, "Phase-Change Media for High-Numerical-Aperture and Blue-Wavelength Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.40, 3B, pp.1592-1597, 2001.
- 10) N. Yamada, M. Otoba, K. Nagata, S. Furukawa, K. Narumi, N. Akahira, and F. Ueno, "Phase-change optical disc with nitride layers," *Proc. SPIE*, vol.3401, pp.24-32, 1998.
- 11) <http://www.isom.jp/>
- 12) K. Mishima, D. Yoshitoku, H. Itoh, T. Kikukawa, S. Yamatsu, H. Inoue, T. Komaki, K. Tanaka, and T. Aoi, "150 GB, 6-layer write once disc for Blu-ray Disc system," *Proc. SPIE*, vol.6282 p628201, 2006.
- 13) H. Habuta, M. Tomiyama, K. Takahashi, M. Tsukuda, N. Miyagawa, K. Nishiuchi, and N. Yamada, "Century Stable Quadruple-Layer BD-R using Te-O-Pd based Films," *Tech. Dig. ISOM*, p.Mo-B-05, 2006.
- 14) I. Ichimura, K. Saito, T. Yamasaki, and K. Osato, "Proposal for a multilayer read-only-memory optical disk structure," *Appl. Opt.*, vol.45, pp.1794-1803, 2006
- 15) N. Shida, T. Higuchi, Y. Hosoda, H. Miyoshi, A. Nakano, and K. Tsuchiya, "Multilayer optical

read-only-memory disk applicable to Blu-ray Disc standard using a photopolymer sheet with a recording capacity of 100 Gbyte," Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, 7B, pp.4983-4986, 2004

## ■8 群-2 編-3 章

### 3-4 光ディスクの将来技術

(執筆者：新谷俊通) [2009年5月 受領]

光ディスクの製品は CD から始まり、DVD、Blu-ray Disc (BD) へと記録容量を向上させてきた。この記録容量の向上は、主に光源の短波長化と対物レンズの開口数 (NA) を向上させ、記録密度を向上させることによって達成された (信号処理など再生系の技術の進歩も容量向上に寄与している)。BD では、光源波長 405 nm、NA 0.85 のシステムを採用し、直径 120 mm のディスクにおいて、単層 25 GB、2 層 50 GB の容量を実現している。

今後使用されるデジタルデータの予想量から、更なる大容量化が望まれるが、これまで進めてきた光源の短波長化は困難であると予想される。その理由は、紫外線レーザーの近い将来の実現が困難であると予想されることと、光ディスクの基板などに用いられる樹脂などの材料が紫外光を吸収するため、光検出器において検出される光量が著しく低下するからである。

このため、大容量光ディスクを実現するために、新原理光ストレージ方式が幾つか提案されている。これらの技術は大きく「多層・多重化」と「高密度化」に分けられる (あるいは、その組合せもある)。

本節では、多層・多重化として、多層光ディスク、ホログラム、2 光子吸収について、高密度化として、固浸レンズ (SIL) と超解像技術について、概要を解説する。

#### 3-4-1 多層記録

多層・多重化の最も簡単な方法が、媒体の厚さ方向に複数の記録層を設ける方法である多層記録である (前節参照)。すでに 2 層 DVD、2 層 BD は市場に存在し、それぞれ 9.5 GB、50 GB の容量を有する。この方法は、光は遠くまで伝播するという性質をうまく利用しており、光ストレージの強みの一つである。研究レベルでは、6 層の記録型ディスク<sup>1)</sup>や、20 層の再生専用 (ROM) ディスク<sup>2)</sup>の成果が報告されている。

多層記録の課題は様々あるが、その主なものは、光の透過率と反射率のバランスの設計、相関クロストークの低減、球面収差の低減である。これらの課題については、参考文献 2) 及びその参考文献に記載されているので参照されたい。

#### 3-4-2 ホログラム

ホログラム記録では、媒体内に回折パターンを記録する。記録時には、データパターンを有する信号光と、ある一定のパターンを有する参照光をある角度で照射し、その干渉パターンを媒体内に記録する。再生時には、上記の参照光のみを記録時と同じ角度で照射すると、その参照光と媒体内の回折パターンが干渉し、上記のデータパターンを有する回折光が射出される。

ホログラム記録が高密度記録を可能にする理由は、細かい回折パターンを 2 次元で作製できることと同時に、角度多重を可能とする点である。例えば、信号光の媒体への入射角度と媒体の位置を固定し、上記の参照光の媒体への入射角度を  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  と変え、それぞれの角度で信号光のデータパターンを  $P_1, P_2, \dots, P_n$  としたとする。その場合、再生時に参照光の

角度を  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  と変えていくと、それぞれの角度で、データパターン  $P_1, P_2, \dots, P_n$  の回折光が媒体から出射される。すなわち、光の入射位置は同じでも、角度で異なった 2 次元のパターンを記録することが可能となる。

ホログラム記録は、1960 年代に提案され、長年研究されてきたが、長期間データを保存することが可能な媒体の開発が大きな課題の一つであった。1990 年代に入り、有機分子を用いたホログラム用媒体が開発され<sup>3)</sup>、ホログラムの実用的な研究開発が加速された。

上記の原理と媒体を用い、直径 120 mm で記録容量 300 GB、データ転送レート 160 Mbps の目処がほぼつけられた<sup>4)</sup>。原理的には容量 1.6 TB、転送レート約 1 Gbps が可能といわれている。

上記の例とは別に、従来の光ディスクと互換性を確保しやすい方式である Collinear ホログラム方式も提案されている<sup>5)</sup>。

### 3-4-3 2 光子吸収

3-4-1 項で述べた多層技術では、各層の反射率・透過率・吸収率のバランスを確保するのが困難であるため、積層数に上限があった。この問題は、例えば、記録再生するためにレーザ光を集光した層のみの反射率が向上するようなシステムが存在すれば解決されるであろう。このことを目的としたのが 2 光子吸収記録である。

通常の半導体では、バンドギャップが存在し、そのバンドギャップのエネルギー  $E_g$  よりも大きなエネルギーをもつ光子のみを吸収する。それに対し、2 光子吸収材料は、価電子帯の電子が二つの光子を同時に吸収する。すなわち、1 光子エネルギーを  $E_{ph}$  と書くと、 $2 E_{ph} > E_g$  が成り立つ。2 光子吸収物質は、2 光子エネルギー  $2 E_{ph}$  を吸収した後、エネルギーが  $2 E_{ph}$  よりも小さな 1 光子（蛍光）を放出する。

ここで重要なことは、通常的光吸収確率は入射パワーに依存しないことに対し、上記の 2 光子吸収確率は、入射パワー密度の 2 乗に比例することである。すなわち、2 光子吸収物質にレンズを通して光を入射すると、光パワー密度が高くなる焦点付近で 2 光子吸収が際立って起こる。

2 光子吸収記録では、上記のメカニズムを用いて層選択を行う。すなわち、記録には、 $E_{ph}$  の光子エネルギーには反応せず、 $2 E_{ph}$  の光子エネルギーに反応して変化する記録材料を用いることにより、光が集光した部分にのみデータを記録することができる。再生には、2 光子吸収後に射出される蛍光を検出することにより、集光した部分に書かれている記録データのみを検出することができる。すなわち、焦点以外では  $E_{ph}$  の光子を吸収しないこと、焦点のみで  $2 E_{ph}$  の光子を吸収することから、焦点を結ばない限りはどこまでも物質内を光が進み、かつ、層間クロストークなしで層選択記録再生が可能となることが、この記録原理の特徴である。

この原理により、C、Mg ドープの  $Al_2O_3$  媒体を用いた記録<sup>6)</sup>、有機材料を用いた媒体<sup>7)</sup>での 100 層記録や 300 層記録<sup>8)</sup>の報告がある。

上記の 2 光子吸収を用いた多層記録とは別に、エレクトロクロミック材料を用いて層選択を行う多層技術<sup>9)</sup>も提案されている。この方法では、媒体は各記録層に接している電極を有し、その電極に電圧を印加して 1 層のみを着色させることによって記録再生する層を選択する。

### 3-4-4 固浸レンズ (SIL)

SIL (Solid Immersion Lens) では、これまで CD から BD へと記録密度を向上させてきた方法の一つである、対物レンズの  $NA$  の向上を更に押し進めた技術であり、1.0 よりも大きな  $NA$  を用いることによって、光スポット径  $\lambda/NA$  ( $\lambda$  は入射光波長) を縮小させる高密度化技術である。元々は高解像度顕微鏡用レンズとして発明され<sup>10)</sup>、その後、光記録に応用された。

SIL の原理を簡単に説明する。レンズはここでは半球形であるとする。いま、入射光がレンズ底面に対して入射角  $\theta_i$  で入射するとする。ここで、レンズの屈折率を  $n_L$  とすると、 $NA = n_L \sin \theta_i > 1$  である場合、 $\text{Arcsin}(1/n_L)$  以上の角度の部分は全反射し、レンズから光は出射しない。このことが、通常のレンズでは  $NA$  が 1.0 を超えない理由である。

しかし、この全反射成分は、レンズ表面に近接場を形成しながら全反射する。このレンズが媒体表面に接近した場合、この近接場が媒体表面と結合し、媒体内に伝達する。すなわち、媒体が接近した場合には、実効的に  $NA > 1.0$  を実現することが可能となる。

SIL 記録では、レンズと媒体の距離を約 20 nm 程度に保ちながら媒体を回転させることによってデータを記録再生する。このためのサーボ技術が必要であるが、SIL 記録の利点の一つは、従来の光記録で用いられてきた光学理論がそのまま適用できることである。

この SIL で 100 Gb/in<sup>2</sup> を超える記録密度を再生した例<sup>11)</sup>や、また SIL と多層を組み合わせた大容量化技術<sup>12)</sup>が報告されている。

### 3-4-5 超解像

超解像とは、 $\lambda/NA$  で決まるスポットサイズ内に、より小さな実効スポットを作製することによって光学分解能を実効的に向上させる技術である。そのアイデアのほとんどは、熱を利用する。

光スポットは強度分布をもち、その中心で強度が最大となる。いま、媒体が光を吸収し、かつ、その媒体の中に、温度によって屈折率が可逆的に変化する物質が含まれているとする。この媒体に光を集光した場合、光スポットの中心部分付近の温度が最も高くなる。すると、媒体上に屈折率の分布が作られ、このことにより、光スポットの実効的な強度分布が、入射した光の分布とは異なる。このことが、光学分解能を向上させる要因となる。

元々、超解像技術は、光磁気記録の高密度化のために考案された<sup>13)</sup>。その後、このアイデアを ROM ディスクへ応用するために、相変化記録材料を再生層として、相変化材料の融解領域を実効スポットとする方法が考案された<sup>14)</sup>。

その後、有機材料<sup>15)</sup>や酸化物<sup>16)</sup>を再生層とする方法や、Super-RENS<sup>17)</sup>などが提案された。超解像の能力の検証には、光学分解能が向上したことを観察するために、主に CN 比を測定する方法が用いられるが、Super-RENS におけるビットエラー率測定の報告もある<sup>18)</sup>。また、超解像と多層技術を組み合わせるアイデアも提案されている<sup>19), 20)</sup>。

#### ■参考文献

- 1) I. Ichimura, T. Maruyama, J. Shiraishi, and K. Osato, "High-density multilayer optical disc storage," Proc. SPIE, vol.6282, 628212, 2006.
- 2) A. Mitsumori, T. Higuchi, T. Yanagisawa, M. Ogasawara S. Tanaka, and T. Iida, "Multilayer 500 Gbyte Optical Disk," Jpn. J. Appl. Phys., vol.48, 03A055, 2009.
- 3) L. Dhar, A. Hale, H. E. Katz, M. Schilling, M. G. Schnoes, and F. C. Schilling, "Recording media that exhibit

- high dynamic range for digital holographic data storage,” *Opt. Lett.*, vol.24, pp.487-489, 1999.
- 4) 例えば以下の Web に、よくまとまった資料が掲載されている:  
<http://asia.stanford.edu/events/spring08/slides402S/0508-Curtis.pdf>
  - 5) H. Horimai, X. Tan, and J. Li, “Collinear Holography,” *Appl. Opt.*, vol.44, pp.2575-2579, 2005.
  - 6) M. S. Akselrod, “Multilayer Recording and Dynamic Performance of Volumetric Two-Photon- Absorbing Fluorescent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Media,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.46, pp.3902-3905, 2007.
  - 7) A. N. Shipway, M. Greenwald, N. Jaber, A. M. Litwak, and B. J. Reisman, “A New Medium for Two-Photon Volumetric Data Recording and Playback,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, pp.1229-1234, 2006.
  - 8) E. Walker, A. Dvornikov, K. Koblentz, S. Esener, and P. Rentzepis, “Toward terabyte two-photon 3D disk,” *Opt. Exp.*, vol.15, pp.12264-12276, 2007.
  - 9) A. Hirotsune, M. Mukoh, and M. Terao, “Layer-Selection-Type Recordable Optical Disk with Inorganic Electrochromic Film,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, pp.1235-1238, 2006.
  - 10) S. M. Mansfield and G. S. Kino, “Solid immersion microscope,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.57, pp.2615-2616, 1990.
  - 11) M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furuki, M. Takeda, M. Yamamoto, T. J. Schaich, B. M. van Oerle, H. P. Godfried, P. A. C. Kriele, E. P. Houwman, W. H. M. Nelissen, G. J. Pels, and P. G. M. Spaaij, “High-Density Near-Field Readout Using Diamond Solid Immersion Lens,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, pp.1311-1313, 2006.
  - 12) C. A. Verschuren, F. Zijp, J. M. A. van den Eerenbeemd, M. B. van der Mark, and J. Lee, “Towards Cover-Layer Incident Read-Out of a Dual-layer Disc with a NA = 1.5 Solid Immersion Lens,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.44, pp.3554-3558, 2005.
  - 13) K. Aratani, A. Fukumoto, M. Ohta, M. Kaneko, and K. Watanabe, “Magnetically induced super resolution in a novel magneto-optical disk,” *Proc. SPIE*, vol.1499, pp.209-215, 1991.
  - 14) K. Yasuda, M. Ono, K. Aratani, A. Fukumoto, and M. Kaneko, “Premastered Optical Disk by Superresolution,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.32, pp.5210-5213, 1993.
  - 15) M. Hatakeyama, T. Ando, K. Tsujita, K. Oishi, and I. Ueno, “Super-Resolution Rewritable Optical Disk Having a Mask Layer Composed of Thermo-Chromic Organic Dye,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39, pp.752-755, 2000.
  - 16) T. Shintani, M. Terao, H. Yamamoto, and T. Naito, “A New Super-Resolution Film Applicable to Read-Only and Rewritable Optical Disks,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.38, pp.1656-1660, 1999.
  - 17) J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, “An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.73, pp.2078-2080, 1998.
  - 18) J. Kim, J. Bae, I. Hwang, J. Lee, H. Park, C. Chung, H. Kim, I. Park, and J. Tominaga, “Error Rate Reduction of Super-Resolution Near-Field Structure Disc,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.46, pp.3933-3935, 2007.
  - 19) H. Tajima, H. Yamada, T. Hayashi, M. Yamamoto, Y. Harada, G. Mori, J. Akiyama, S. Maeda, Y. Murakami, and A. Takahashi, “Bit-Error-Rate-Based Evaluation of energy-Gap-Induced Super-Resolution Read-Only-Memory Disc in Blu-ray Disc Optics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.47, pp.6013-6015, 2008.
  - 20) T. Shintani, Y. Anzai, J. Ushiyama, H. Kudo, A. Hirotsune, H. Minemura, T. Maeda, and H. Miyamoto, “Sub-Terabyte-Data-Capacity Optical Discs Realized by Three-Dimensional Pit Selection,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.45, pp.2593-2597, 2006.