

# 次世代光メモリー技術の動向

徳丸 春樹

## Next-Generation Optical Memory Technology

Haruki TOKUMARU

Optical memory faces the walls of market and technology. The market wall means that the progress of networking and other memory technologies is reducing the application field of optical memory. The technology wall means that it is difficult to enlarge the recording capacity by using conventional high-density recording principles that have been used for compact disks to Blu-ray Discs. To overcome these walls, new optical memory technologies described here are being developed based on other concepts such as holograms. The prospects of post-Blu-ray Disc applications by introducing advanced optical memories are also given.

**Key words:** optical memory, storage, optical disk, SIL (solid immersion lens), near-field optical recording, laser, Blu-ray Disc, super resolution, multi-layer, recording capacity, data transfer rate, two-photon absorption, three-dimensional optical storage, micro hologram, hologram

1960年にルビー結晶によるレーザー発振に初めて成功して以来、その応用のひとつとして光メモリーの夢がみられ、これまで発展してきた。メモリーとしての商品化は半導体レーザーの実用化を待つことになり、およそ20年後にビデオディスクが商品化された。図1におもな光ディスク商品の開発の歴史を示すが、翌年には音楽用のCD (compact disk)、その10年後にはミニディスク (MD: MiniDisc)、そしてその後、映像用としてDVD (digital versatile disk)、近年ではBD (Blu-ray Disc)、とおもにオーディオ・ビジュアル (AV: audio/visual) 用途として商品化されてきた。光ディスク産業、研究開発ともにずっと日本が世界をリードしてきており、日本の独壇場とよべる時代がおおよそ30年間続いてきた。

しかし、ここへきて光メモリーを取り巻く状況は大きく変わりつつある。MDがオーディオの世界でもはやされた時代はいつの間にか終わり、はるかに小型で使いやすいフラッシュメモリーに取って代わられた。通信ネットワークの進展によりダウンロードが増え、CDも売り上げが減少しはじめた。映像の世界でも同様な傾向が出てきており、米国ではレンタルのショップの閉店が報じられている。

このようにAVメモリー市場全体の中で光ディスクの存在意義は薄れつつあるが、一方では、それを打開すべくポストBDに向けて技術開発が着々と進んでいる。本稿では、まず、光メモリーが現在「市場」と「技術」の2つの壁に直面していることを述べる。次に、技術の壁を乗り越えるべく提案されている新技術について、研究動向を紹介する。そして、これらポストBD技術によるアプリケーション (市場) を展望してみたい。

### 1. 光メモリーを取り巻く状況—「市場」と「技術」の壁—

2001年に出版された教科書<sup>1)</sup>には、光ディスクの特徴として次のものが挙げられている。

- ① 記録密度が高い
- ② 非接触状態で記録・再生ができ、寿命が長い
- ③ CDのようにプレスして大量複製ができる
- ④ 着脱し、持ち運びできる

このほかに、ROM、追記型、書き換え型といろいろなタイプがあるのも独特である。しかし、通信ネットワークの進展、生活スタイルの変化、他のメモリーの進歩といった

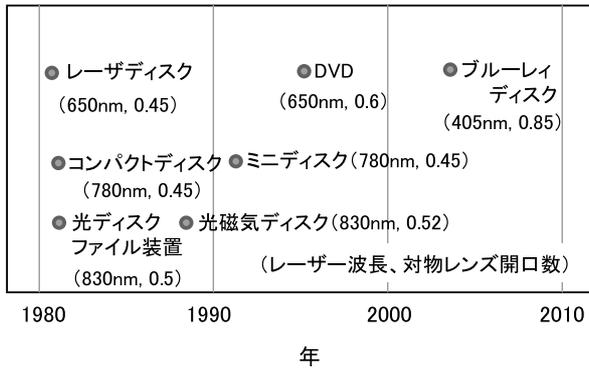


図1 光ディスク商品開発の歴史。

時代の変化に伴い、これらの特徴が必ずしも強みとはいえなくなってきている。この中で、現行の光ディスクが強いあるいは特徴的なのは、②③だと思われる。光ディスクのアプリケーションとしては、AVの収録・頒布媒体としての役割、パソコンなどのソフトウェア・データの記録・頒布媒体としての役割を主として民生分野で担っている。しかし、その役割を代替する技術が近年、急速に進展している。世界的にみれば、通信ネットワークの普及は先進諸国あるいは都市部に限られており、頒布媒体としての役割が早晩なくなるとは思えないが、今後の大幅な発展は望めず、③の大量複製の特徴がフルに生かされない状況になってきている。また、媒体・ドライブの度を越した低価格化のため劣悪な商品が出回り、光ディスクの特徴②の長寿命も生かされているとはいえない。家庭のテレビ録画も、一時はVHSテープの後にはDVDかと思われた時期もあったが、ハードディスクがメインに使われるようになった。一方では、フラッシュメモリの大容量化、低価格化で、これまでの光ディスクの適用分野の一部が取って代わられている。これらの理由から、光ディスクの事業としての魅力がなくなってきており、事業から撤退する企業も出てきている。

ところで、光メモリーは、レーザー光が回折限界に絞れるという性質を利用している。レーザー光のスポット径  $S$  は次式で表わされる。

$$S \propto \lambda / NA \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  はレーザー光の発振波長、 $NA$  は対物レンズの開口数 (numerical aperture) である。対物レンズの  $NA$  は、対物レンズと記録媒体の間に存在する媒質の屈折率を  $n$ 、対物レンズからの絞り込み角度を  $\theta$  とすると、以下の式で表わされる。

$$NA = n \cdot \sin\theta \quad (2)$$

大気中では  $n=1$  であり、媒質が空気であれば  $NA$  は最大1となる。図1に示すように、これまで光メモリーは、

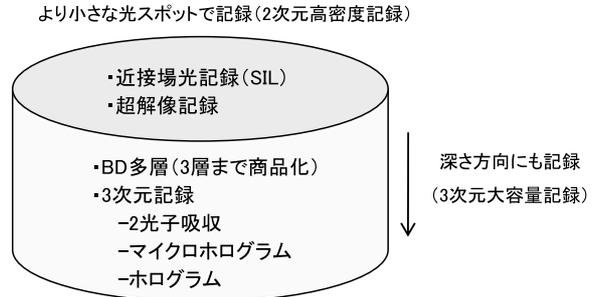


図2 光メモリーの高密度化技術。

レーザーの短波長化と対物レンズの高NA化により、光スポットを微小化しディスク面内の記録密度を上げ、CD、DVD、BDと次々に商品化されてきた。しかし、これ以上の光源の短波長化は、まだそのような光源がないこと、短波長域では光吸収が増加するため新規の光学材料に変える必要があることなどから、困難になってきている。NAもBDで1に近くなっており、限界にきている。今後の光メモリーの大幅な性能アップは、これまでの技術の単なる延長ではだめで、まったく新規のアイデアなり技術が求められている。このように光メモリーは、事業的にも技術的にも、岐路に立たされている状況にある。

## 2. 光メモリーの研究動向

これまで光メモリーの高密度化は、おもに二次元的にディスク面内の記録密度 (面記録密度) を上げることにあった。現在の研究動向は、図2に示すように大きく分けてさらに光スポットを微小化し面記録密度を上げるやり方と、光の透過性を生かし深さ方向にも記録し三次元 (体積) 的に大容量化を図るやり方がある。前者は、基本的には従来の光メモリーの高密度化の方法と似ているが、SIL (solid immersion lens) や超解像媒体といった新規な技術を導入している。

### 2.1 面記録密度向上からのアプローチ

#### 2.1.1 SILを用いた近接場光記録

NAの限界を打破するために提案されたのが、SILを用いた近接場光記録である。古くから顕微鏡の世界で油浸レンズがあるが、同じ考え方のものである。図3に近接場光記録とBDの光学系を並べて示す。SILと記録媒体との距離をレーザー光発振波長の4分の1程度以下に近接させると、SILの出射面に発生した近接場光が媒体に到達し、伝搬光となる現象が発生する。SILが超半球レンズの場合、NAはSILの屈折率の2乗倍となるため<sup>2)</sup>、例えば、SILの屈折率2.07、対物レンズのNA0.43では、SIL光学系のNAは1.84となり、1より高くすることができる。中沖らは、

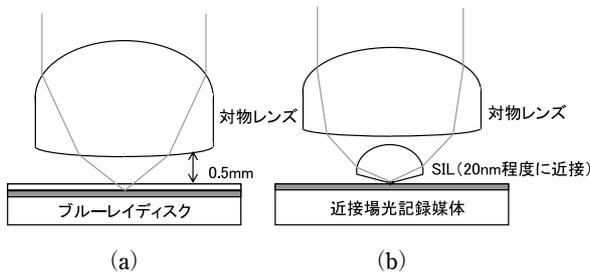


図3 ブルーレイ光学系 (a) と近接場光記録光学系 (b).

半導体レーザー (405 nm) と  $NA=1.84$  の SIL 光学系で, LDPC (low-density parity-check code) と PR (partial response) 等化を組み合わせた信号処理を導入することにより, 記録密度  $109 \text{ Gbit/in.}^2$  で再生ビットに誤りがないことを示した<sup>3)</sup>. 12 cm ディスク換算で 151 GB の容量になる (以下, 特に断らない限り, ディスク直径は CD サイズの 12 cm とする). 媒体に到達した光は伝搬光のため, 現行の光ディスクと同様に, フォーカス動作により多層記録が可能になる. 記録層 4 層で 500 GB の可能性が報告されている<sup>4)</sup>. 実際に鳴海らは,  $NA=1.6$  の SIL 光学系で, 書き換え型 2 層光ディスクに 150 GB 容量に相当する記録密度での記録再生を実証した<sup>5)</sup>. これまではダストなどの媒体上の突起物によるサーボ外れとヘッドクラッシュの課題があったが, カバー層樹脂塗布後に平滑化プロセスを導入することにより, 突起物を取り除いた. この方式の利点のひとつに, ROM ができる点がある. 山岡らは, 結晶粒が 1 nm と微小な誘電体材料を用い, いわゆる筆先記録により, 200 GB 密度のランダムパターンビットの形成に成功している<sup>6)</sup>.

本方式は基本的に現行の光ディスク技術が使えることから, ポスト BD 技術の最有力候補として精力的な研究開発が進められた. その結果, 全反射ギャップサーボ, ダストに対するロバスト性を高めたコンカル型 SIL, 高屈折率トップコート等の技術開発が進み, 紹介した記録再生が行われるレベルまで開発が進んだ. ディスク媒体とヘッドが 20 nm 程度に近接することによるクラッシュの問題, ダストによるコンタミネーションなどは実験室レベルでは一応解決されているが, ハードディスクと同じ問題を抱えることになり, 信頼性の確保が今後の課題であろう. ビット長が短くなるので, 転送レートに関しては有利になる.

### 2.1.2 超解像方式

超解像方式は, 光回折の物理限界を超えた微小なマークの記録・再生を可能にする技術で, すでに光磁気ディスクに導入され商品化されている. 記録できるタイプとしては BD と同じ光学系で 37.5 nm の微小マークを記録した例<sup>7)</sup>

があるが, ランダムデータの安定な記録再生には至っていない. 再生だけに的を絞れば, 超解像方式の導入が比較的楽になる. 再生光を吸収して温度が上昇すると光学特性が変化する薄膜 (以下, 超解像層) を情報記録層に重ねて形成する. 課題として再生耐久性があり, その向上についてはいくつかの報告があるが, Hyot らは超解像層に InSb 膜を用い界面層  $ZrO_2$  膜で挟むことにより, 再生回数を 4 万回と大幅に向上させた<sup>8)</sup>. 中井らは, この媒体構成で 50 GB 容量の ROM を試作し, BD 光学系で実用的なビット誤り率を達成した<sup>9)</sup>. 多層化による大容量化については, 山田らによる 2 層 80 GB 容量 ROM の報告がある<sup>10)</sup>. 本方式は BD の記録密度を比較的容易に上げられ, 装置の変更が少なくすむ利点があるものの, 記録密度の改善が 2 倍程度と低い. したがってそれ以上の高密度化には, 別の技術, 例えば SIL 方式近接場光記録などとの組み合わせが必要になる.

## 2.2 体積記録密度向上からのアプローチ

### 2.2.1 Blu-ray Disc 多層方式

記録層の多層化による BD の大容量化が進んでおり, 2010 年には 3 層 100 GB 容量のディスクが商品化された. 菊川らは, Bi-Ge-O 記録層に記録感度向上のために  $Fe_3O_4$  を光吸収層として用い, 16 層 512 GB (32 GB/1 層) 容量にて実用的な誤り率を確認した<sup>11)</sup>. また, 透過率の違う 2 種類の記録層と厚さの違う 2 種類の間層を積層し, ディスク構造の簡素化を図った<sup>12)</sup>. 積層タイプの多層媒体で懸念される歩留まりの悪さや, 製作コストアップについて有効であると思われる. 中野らは, さらにディスク構造の簡素化を図った<sup>13)</sup>. これまで商品化された 2 層, 3 層ではすべての記録層にトラッキング用溝が形成されているが, 層数が増えると溝形成そのものや全層の溝の偏芯合わせが困難になる. これを解決する手段として, 溝を基板のみに形成する方式を提案し, 16 層 512 GB 容量ディスクに適用し実用レベルの再生信号特性を確認した. 多層 BD-ROM については, 三森らは媒体構造を工夫し, 多重反射によるクロストークを低減した 20 層 500 GB 容量ディスクを試作した<sup>14)</sup>.

多層記録では一般的に, 記録層からの光ヘッドへの戻り光量が極端に減り, 他の記録層からのクロストークが発生する. クロストークの低減については, 紹介した媒体構造で対応する方法と, 光ヘッドに低減手段を施す方法がいくつか提案されている. ここでは, 戻り光量の減少に対応する研究について紹介する. 三上らは, 通信分野で使われているホモダイン検出方式を BD 多層に適用することを提案している. ディスク回転に伴う信号光と参照光間の光路長

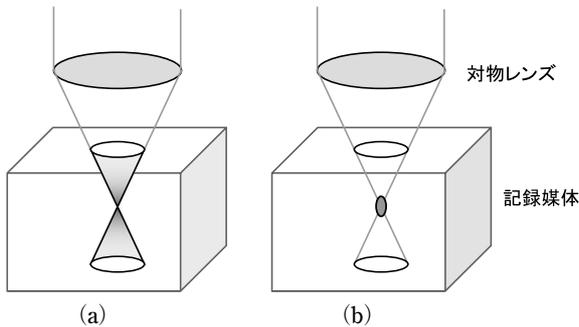


図4 二光子吸収記録の原理。(a) 一光子吸収, (b) 二光子吸収。

差による再生信号の増幅率変動を避けるために、位相ダイバーシティ検出方式を採用し<sup>15)</sup>、BD-Rを用いた実験で再生信号が3.6倍増幅されることを確認した。

BDの多層については、500 GBの大容量記録が実証されており、ポストBD技術の中では最も研究が進んでいる。積層タイプなので、記録媒体の作製プロセスが複雑で歩留まりに難があり、紹介したような簡易な媒体構造が提案されている。一方、ROMに関しては、記録層ごとに情報ピット層を形成する必要があり、課題は残る。多層化により記録パワーが増加すること、戻り光量の激減により再生信号のSN比が低くなることから、高転送レート化はむずかしい。容量と転送レートが、基本的にトレードオフの関係にある。転送レートを上げるには、複数レーザーによる並列記録再生<sup>16)</sup>や、ホモダイン検出方式などの技術の導入が必要になる。

## 2.2.2 三次元記録

### 2.2.2.1 二光子吸収方式

図4に二光子吸収方式の記録原理を示す。通常の光ディスクでみられる一光子吸収では、光が透過した記録媒体中のすべてで吸収されるのに対して、二光子吸収では吸収強度が光強度の2乗に比例するという特性をもつため、光の焦点付近でのみ光吸収が起きる。このため、1 mm程度の厚い媒体でも深くまで光が到達するとともに、深さ方向の分解能が高くなり、数百層の超多層記録の可能性がある。実際にWalkerらは、光酸発生剤と蛍光色素前駆体を分散したポリメチルメタクリレート (PMMA) を記録媒体として、ピコ秒パルスレーザーを用い、1層あたり5 GBの記録密度で200層記録を行っている<sup>17)</sup>。200層と超多層記録の可能性は示されているが、いまだ記録材料の探索段階にあり、いろいろな材料が提案されている。

例えば、秋葉らは、記録感度の大幅な増大を担う材料と短波長域で記録再生可能な材料を組み合わせた記録媒体を提案している<sup>18)</sup>。田中らは、蛍光色素と金イオンをPMMA中に分散させ、金イオンの還元により記録を行うとともに、

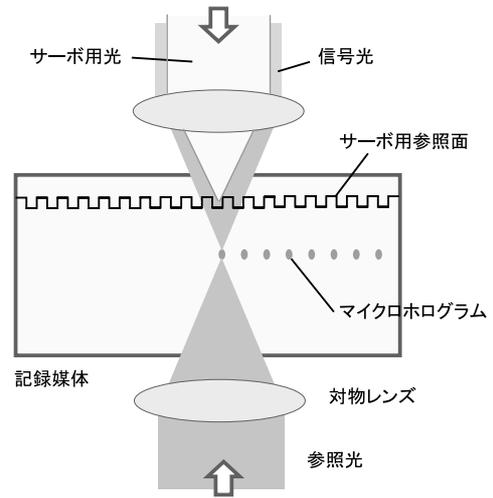


図5 マイクロホログラム記録の原理。

還元された金ナノ粒子の表面プラズモン共鳴により再生信号を増強する媒体を提案している<sup>19)</sup>。Akselrodらは、マグネシウム、炭素を添加した酸化アルミニウム単結晶媒体に20層の記録を試みている<sup>20)</sup>。無機材料のため、きわめて安定な記録ができるのが特徴という。三次元記録では、一般に集光スポットは面内の広がり比べて光軸(深さ)方向の広がりは大きく、深さ方向の記録密度が制限され、層間のクロストークも大きい。そこで川田らは、1  $\mu\text{m}$ 程度の厚さの感光薄膜(記録層)と透明なバッファー層(粘着層)を交互に積層した記録媒体を提案している<sup>21)</sup>。この作製方法には、材料の選択幅が広がることと、簡単に多層記録媒体が作れるという利点がある。一方、二光子吸収記録に通常用いられている極短パルスでピークパワーの大きなチタンサファイア (Ti:S, Ti-Sapphire) レーザーなどの固体レーザーは、高価・大型であり、実用的な装置には搭載できない。このため、小型の短パルス半導体レーザーの開発が進んでいる<sup>22, 23)</sup>。

二光子吸収方式はまだ記録材料の探索段階にあり、動的記録装置による評価があまり行われていない。深さ方向への数百層に及ぶ記録は確認できており、潜在能力は高いだけに、1層あたりの記録密度がDVD密度程度で記録速度も低いのが大きな課題といえる。

### 2.2.2.2 マイクロホログラム方式、マイクロリフレクター方式

マイクロホログラム記録のアイデアはEichlerにより提案された<sup>24)</sup>。図5にマイクロホログラム記録の原理を示す。マイクロホログラム記録では、信号光と参照光の2本の光束が互いに反対方向からの媒体上の1点に集光され、微小なホログラムが形成される。この記録されたホログラムに参照光を照射すると、逆向きの回折光が反射光とな

り、反射光の有無として読み出すことができる。この方式の利点は、現行の光ディスク技術と同じくビット単位で読み書きできるため現行技術が使えることと、ホログラム記録と同じく体積記録で多層記録が可能にある。McLeodらは、125  $\mu\text{m}$  厚のフォトポリマーディスクにNd:YAGレーザーを用いて初めて12層記録を行った<sup>25)</sup>。Orlicらは、300  $\mu\text{m}$  厚にして39層記録を行った。また、DVDと同等の面記録密度で記録できることを示した<sup>26)</sup>。以上は固体レーザーを用いた例だが、ソニーの堀籠らは、半導体レーザー(405 nm)で記録できるように光路長補正機構を開発し、厚さ300  $\mu\text{m}$  の記録層に10層記録を行い、1層あたりの記録容量3.3 GBで実用的な誤り率を確認した<sup>27)</sup>。図5に示すように、基板にトラッキング用溝を形成しサーボ参照面として用い、信号光と参照光を1点に集光させるために5軸のビーム位置サーボを行う。

ソニーがマイクロリフレクターと称する記録方式には、紹介したマイクロホログラムタイプと、その後に表示した空孔記録タイプ<sup>28)</sup>がある。空孔記録タイプは、前述の二光子吸収方式と同じ原理に基づいており、集光点近傍に非線形吸収を起こし微小な空孔を形成し、その屈折率変化を読み出す。250  $\mu\text{m}$  厚の記録層が50  $\mu\text{m}$  厚のカバー層と1.2 mm厚の基板に挟まれている。マイクロホログラムタイプと同じくサーボ用参照面を基準にして記録位置を決める。記録にはピコ秒パルスTi:Sレーザー(405 nm)を用いた。1層の記録容量は6 GB、記録時の線速度は0.2 m/sで34層の記録を行い、実用的なビット誤り率を得た。ディスク容量としては204 GBになる<sup>29)</sup>。さらに、ピコ秒半導体レーザー(405 nm)<sup>23)</sup>を用いて30層記録を実証した<sup>30)</sup>。記録密度は現状では記録媒体の性能に制限されているという。

片山らは、高信頼性と低消費電力を目的に、可動部のない新しいコンセプトのマイクロホログラム方式の光メモリーを提案している<sup>31)</sup>。フォトポリマー記録媒体中のビーム走査を液晶デバイスにより電氣的に行い、数ビットではあるが三次元記録できることを確認した。波長および角度で多重記録もできるという。マイクロホログラム記録においても戻り光量が小さくSN比が取れないという課題があるため、位相多値記録を行い、BD多層の項で紹介したホモダイン検出する方式が提案されている<sup>32)</sup>。原理検証実験で信号成分が約10倍増強され、ノイズが抑圧され8レベルの多値記録ができることを示した。強度変調との併用も可能という。

以上に述べたように、マイクロホログラム方式は、BDよりは記録層数は多いものの、面内記録密度はDVDと同

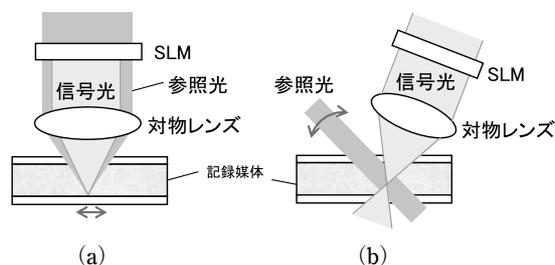


図6 ホログラム記録の原理と多重方式。(a) シフト多重方式、(b) 角度多重方式。

程度と低い。また、記録実験も低速でしか行われておらず、ビーム位置制御も複雑なことから、転送速度の向上はむずかしいと思われる。容量および転送レートの性能向上には、紹介した位相多値記録などのホログラム記録の特徴を生かした新しい技術・アイデアの導入が求められる。

### 2.2.2.3 ホログラム記録

Heerdenにより、1963年に初めて体積ホログラムに情報を多重して記録するメモリーの概念が提案された<sup>33)</sup>。その後、ホログラム記録は何度かチャレンジされたが、1990年代中ごろにできた米国の2つのプロジェクトにより研究開発が進み、再び注目されるようになった。この背景には、空間変調素子(SLM: spatial light modulator)や撮像デバイス等のホログラム記録に必要なデバイスの進歩がある。その後、ベンチャー企業が実用化をアナウンスしたことから、一気に研究開発への関心が盛り上がった。ホログラム記録は、これまで紹介したビット単位で記録する方式とは違い、ページとよばれる二次元の情報単位で読み書きする。図6にホログラム記録の原理と多重方式を示す。二次元イメージに変換された情報を液晶デバイスなどのSLMにより信号光に変換し、信号光と同一光源から分岐した参照光とを記録媒体中で干渉させ、その干渉縞がホログラムとして記録される。記録時と同じ参照光をホログラムに照射し、信号光を復元してCMOSなどの撮像デバイスを用いてページ単位で読み出す。ホログラム記録は媒体中の同じ場所に多重して記録できるため、大容量が可能になる。ホログラムの多重方式には、信号光と参照光の交差角度を少しずつ変えて多重記録する角度多重記録方式、記録媒体を少しずつ横移動することにより多重記録するシフト多重方式などがある。ホログラム記録の方式としては、コリニア方式<sup>34)</sup>、あるいはコアキシャル方式とよばれる対物レンズの同一光軸上に信号光と参照光があるもの(以下、同軸方式)と、ポリティピックとよばれる方式<sup>35)</sup>が主流となっている。

ポリティピック方式は角度多重記録方式で、信号光と参照光の2光路の光学系が必要なため、光ヘッド、装置の小型

化が困難だった。Hoskins らは、信号光と参照光とで対物レンズを共用することで小型化を実現するモノキュラー光学系を提案した<sup>36)</sup>。嶋田らは、本光学系と半導体レーザーユニット (405 nm) を用い、500 GB 容量に相当する記録密度 610 Gbits/in<sup>2</sup> を達成するのに必要となる再生信号の SN 比を得た<sup>37)</sup>。記録媒体は厚さ 1.5 mm のフォトポリマー記録層を 0.1 mm と 1 mm の透明基板で挟んだ構造になっている。

同軸方式としては、コアキシャル方式の例について紹介する。図 6 に示すように、コアキシャル方式はシフト多重記録方式で、信号光と参照光を同一の SLM で生成して同一の対物レンズで読み書きする。記録時には、SLM の中央部に記録情報を有する信号光、周辺部に参照光が生成され、同一光軸上を伝搬する。再生時には SLM で周辺部の参照光のみ生成し、記録されたホログラムに照射し再生する。信号光と参照光の相対的な位相変化がなく機械的な振動などの外乱に強い、光学系がコンパクトで現行の光ディスクと同じような形態が取れる、さらに、シフト多重のためディスクを連続回転しながら記録再生が行えるという利点がある。田中らは、外部共振器型半導体レーザー (405 nm) と NA 0.85 の対物レンズを用い、LDPC 符号を導入することにより、600 μm 厚のフォトポリマー記録媒体へ約 180 GB の容量相当の記録密度である 415 Gbit/in<sup>2</sup>での記録を行った<sup>38)</sup>。高崎らは、記録媒体の移動に合わせてビーム照射位置を動かすことにより、低レーザーパワーでホログラム記録を可能にする技術<sup>39)</sup>を用いた小型のホログラム記録装置を試作した<sup>40)</sup>。さらに記録密度を上げるために、これまで述べた強度変調による記録に加えて、位相情報を用いた多重記録が検討されている。Ayres らは、四値位相変調されたページ情報をホモダイン検出して、従来の 3 倍以上の高密度化を図る方式を報告した<sup>41)</sup>。

ホログラム記録は光の位相まで記録しており、高密度化への潜在能力は高い。また、ページ単位で一度に数 100 Kbit といった情報が読み書きできるので、データ転送レートの潜在能力も高い。反面、媒体、光源、光学系、信号処理 (IC チップ) と現行の光ディスクの技術が使えず、より高性能なものが必要となる。各種要素技術の開発が進み動的な記録装置が組み上げられ、記録実験の結果が発表されるようになってきたが、当初期待されたほどには性能が出ていないというのが現状だろう。さらに感度が高く多重度も多い媒体など、着実な研究開発が求められる。

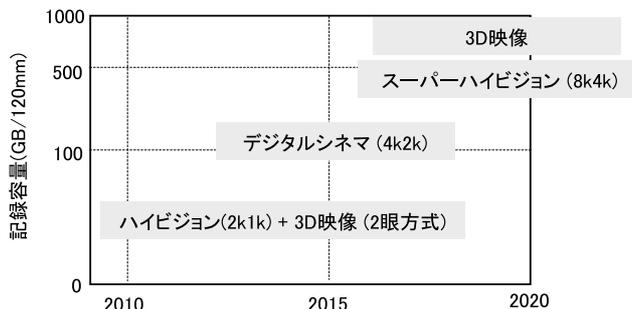


図7 今後の映像サービスの進展。

### 3. ポスト Blu-ray Disc 光メモリー技術とアプリケーション(市場)

ポスト BD のアプリケーションのひとつの方向は、1章で挙げた現行光ディスクの特徴である②長寿命、③大量複製可能の追求にある。前者は近年における取り扱い情報量の増大に伴うさまざまなデータや AV コンテンツのアーカイブ分野であり、後者は AV サービスの進展に応じたコンテンツ頒布用 ROM 分野である。今後の映像サービスの進展を図 7 に示すが、映像の高精細化や自然な立体映像と映像の高度化に伴い記録する情報量はますます増大していく。例えばスーパーハイビジョンの場合、オリジナルのデータレートは最大 144 Gbps に達し、その放送や民生用展開では大幅に情報圧縮しても数百 Mbps のレートになり、2 時間収録には数百 GB の容量が必要になる。現行の BD のほぼ 10 倍の性能になり、通信ネットワークのスピードは追いつかない。換言すれば、AV の進展に応じて通信ネットワークよりも常にスピードが速いことが求められる。アーカイブ分野については、民生分野で安価な低品質の光ディスクが広くいきわたり、「光ディスクはもたない」と評判がよくない。一方では、放送業務用途光ディスクのように媒体が品質管理され、信頼性を築きつつある分野もある。アーカイブ用途では、寿命を保証すれば他にない有用なメモリーになる。これらの現行光ディスクの特徴を生かすアプリケーションでは、AV コンテンツ頒布用途の場合は ROM が簡単に安価にできることが求められる。アーカイブ用途では、媒体の長寿命はもちろんだが、長期間にわたり再生機器が安定的に供給されることが求められる。その意味では、AV 用途と共通の技術を使用した方式で規格化され、広く生産されていることが重要になる。現行光ディスクと技術が共通している BD 多層 (ROM 作製の点からは層数は少ないほうがよい)、近接場記録、超解像、また、本稿では紹介していないが薄型光ディスク<sup>42)</sup>などが適していると思われる。ホログラム記録のような体積記録タイプでは、ROM が簡単には作れないからである。そ

のほか、環境負荷の低減、情報セキュリティーなどに時代の強い要請があるが、光メモリーはこれらの要求に適合していると思われる。

現行光ディスクの形態を想定しないのであれば、新たな魅力ある特徴をメモリーにもたせることができる。超高速、超大容量、高速アクセス、小型、低環境負荷、高信頼性、低コスト、可動部なし(固体メモリー)、書き換え可能などのキーワードないし特徴が挙げられる。これらの特徴の中から、何か他のメモリーと決定的な差別化を図ることが求められる。大容量や高速化では、他のメモリーを凌駕する性能が欲しい。大容量化については、紹介したポストBD技術は、このままではせいぜい1TBまでの技術と思われ、何らかのブレークスルーが必要となる。ほとんどのポストBD技術がレーザー光の集光による熱記録を原理としているのに対して、ホログラム記録などの三次元記録では、文字通り光記録であり、光の波長、位相、偏光などの適用が可能になる。紹介した位相多重ホモダイン検出方式などの適用により、容量の増大を図る必要がある。高速化について期待がもてるのは、ホログラム記録である。ページ単位で記録することにより、ビット単位の記録方式に比べて高速化が可能と思われる。また、本稿では紹介していないが、五次元(三次元記録、波長、偏光)記録などの研究の動きもある<sup>43,44)</sup>。これらの光の本来の性質を生かすことにより、大容量化と転送速度の向上が期待できる。光メモリーの場合、レーザー、光学系ともに、小型化にはもともと適さない。紹介したポストBD技術はほとんど、レーザー、光学系ともに大きく、複雑化する。したがって、装置としての小型化や高速アクセスには限界がある。高信頼性や可動部なしでは、マイクロホログラム方式による固体メモリーの例が挙げられる。何らかの光記録方式による固体メモリーの研究開発が待たれる。また、現在研究されているBD多層を除いた三次元記録は書き換えできないタイプである。アプリケーションを広げるためには、書き換え機能の付加も今後の課題となろう。

「市場」と「技術」の壁を乗り越えるべく研究開発が進められている光メモリー技術について紹介した。今後の研究開発は、これまでの光ディスクの特徴を徹底的に生かしアプリケーションを広げていこうとする立場と、競合する他のメモリーの性能を超える、あるいは新しい特徴を身につけた新規の光メモリーを作り上げてアプリケーションを広げていこうとする立場の2つの方向性があると思われる。光ディスク事業が厳しい状況にある今、前者でがんばりながら時間をかせぎつつ、後者の方向性を見いだすこと

ができればベストシナリオになる。光の潜在能力は高く、光通信などと比べれば、その一部の性能しかメモリーには使われていないのは本当に残念なことである。光メモリー技術にはまだまだ発展の余地は残されており、着実な研究開発を期待したい。

## 文 献

- 1) 黒川隆志, 滝沢国治, 徳丸春樹, 渡辺敏英: 光情報工学(コロナ社, 2001) p. 93.
- 2) B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studenmund and G. S. Kino: "Near-field optical data storage using a solid immersion lens," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 388-390.
- 3) A. Nakaoki, O. Kawakubo, T. Ohkubo, T. Watanabe and T. Yamagami: "109 Gbit/in<sup>2</sup> recording on a near-field optical disc using the PR (12221) /17PP code LDPC decoding," *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS) 2008*, TD05-151 (Bellingham, 2008).
- 4) C. A. Verschuren, F. Zipp, D. M. Bruls, J. I. Lee and J. M. A. van den Eerenbemd: "Cover-layer incident near-field recording: Towards 4-layer discs using dynamic tilt control," *Proc. SPIE*, **6282** (2006) 62820M.
- 5) K. Narumi, K. Hisada, T. Mihara, T. Shiono, R. Kojima, H. Tomita, M. Birukawa and N. Yamada: "One head writing/erasing on a rewritable dual-layer NFR optical disk having high-index cover and separation layers," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Mo-D-03 (Tokyo, 2010).
- 6) N. Yamaoka, S. Murakami, Y. Sugawara, S. Ohshima, T. Takishita and F. Yokogawa: "Thermal recording for 200 GB SIL disc," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2009*, Mo-D-04 (Tokyo, 2009).
- 7) J. Kim, I. Hwang, H. Kim, I. Park and J. Tominaga: "Signal characteristics of super-resolution near-field structure disks with 100 GB capacity," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 3609-3611.
- 8) B. Hyot, S. Olivier, F. Laulagnet, M.-F. Armand and B. Andre: "High capacity SuperRENS-ROM disc with InSb active layer: Toward 76 GB hybrid dual level," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2009*, Mo-D-06 (Tokyo, 2009).
- 9) K. Nakai, M. Ohmaki, N. Takeshita, L. Poupinet, B. Andre and B. Hyot: "Bit-error-rate evaluation of readout signal from SuperRENS-ROM disc with InSb film," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2009*, Mo-C-01 (Tokyo, 2009).
- 10) H. Yamada, T. Hayashi, M. Yamamoto, Y. Harada, H. Tajima, S. Maeda, Y. Murakami and A. Takahashi: "Bit-error-rate evaluation of energy-gap-induced super resolution (EG-SR) ROM disc with dual layer structure," *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS) 2008*, TD05-153 (Bellingham, 2008).
- 11) M. Inoue, A. Kosuda, K. Mishima, T. Ushida and T. Kikukawa: "512 GB recording on 16-layer optical disc with Blu-ray Disc based optics," *Proc. SPIE*, **7730** (2010) 77300D.
- 12) T. Kikukawa, M. Inoue, A. Kosuda and T. Ushida: "A proposal of a design principle of super-multilayer," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Th-L-06 (Tokyo, 2010).
- 13) M. Ogasawara, K. Takahashi, M. Nakano, M. Inoue, A. Kosuda and T. Kikukawa: "16 layers write once disc with a separated guide layer," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Th-L-07 (Tokyo, 2010).
- 14) A. Mitsumori, T. Higuchi, T. Yanagisawa, M. Ogasawara, S. Tanaka and T. Iida: "Multi-layer 400 GB optical disk," *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS) 2008*, TD05-04 (Bellingham, 2008).

- 15) H. Mikami, T. Shimano, T. Kurokawa, T. Ide, J. Hashizume, K. Watanabe and H. Miyamoto: "Readout-signal amplification by homodyne detection scheme," *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS) 2008*, TD05-15 (Bellingham, 2008).
- 16) 徳丸春樹: "並列記録再生技術", 光学, **28** (1999) 83-88.
- 17) E. Walker, A. Dvornikov, K. Coblenz and P. Rentzepis: "Terabyte recorded in two-photon 3D disk," *Appl. Opt.*, **47** (2008) 4133-4139.
- 18) M. Akiba, E. Goto-Takahashi, H. Takizawa, T. Sasaki, H. Mochizuki, T. Mikami and T. Kitahara: "Two-photon sensitized recording materials for multilayer optical disk," *Proc. SPIE*, **7730** (2010) 773018.
- 19) T. Tanaka: "Plasmon enhanced three-dimensional multi-layer optical disk," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Mo-D-02 (Tokyo, 2010).
- 20) M. S. Akselrod, S. S. Orlov, G. M. Akselrod, G. J. Sykora, K. J. Dillin and T. H. Underwood: "Progress in bit-wise volumetric optical storage using aluminum oxide single crystal media," *Proc. SPIE*, **6620** (2007) 662003.
- 21) M. Miyamoto, M. Nakano, M. Nakabayashi, S. Miyata and Y. Kawata: "Fabrication of multilayered photochromic memory media using pressure-sensitive adhesives," *Appl. Opt.*, **45** (2006) 8424-8427.
- 22) S. Yamazoe, M. Katou and T. Kasamatsu: "Ultra-compact (palm-top size) low-cost maintenance-free (>3000 h) diode-pumped femtosecond (160 fs) solid state laser source for multiphoton microscopy," *Proc. SPIE*, **7183** (2009) 718334.
- 23) R. Koda, T. Oki, T. Miyajima, H. Watanabe, M. Kuramoto, M. Ikeda and H. Yokoyama: "100 W peak-power 1 GHz repetition picoseconds duration optical pulse generation using blue-violet GaInN diode laser mode-locked oscillator and optical amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, **97** (2010) 021101.
- 24) H. J. Eichler, P. Kueimmel, S. Orlic and A. Wappelt: "High-density disk storage by multiplexed microholograms," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **4** (1998) 840-848.
- 25) R. McLeod, A. Daiber, M. McDonald, T. Robertson, T. Slagle, S. Sochava and L. Hesselink: "Microholographic multilayer optical disk data storage," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 3197-3207.
- 26) S. Orlic, E. Dietz, S. Frohmann, J. Gortner and C. Muella: "Microholographic multilayer recording at DVD density," *Optical Data Storage Topical Meeting 2007*, MB4 (Washington DC, 2007).
- 27) T. Horigome, K. Saito, H. Miyamoto, K. Hayashi, G. Fujita, H. Yamatsu, N. Tanabe, S. Kobayashi and H. Uchiyama: "Recording capacity enhancement of micro-reflector recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 5881-5884.
- 28) D. Day and M. Gu: "Formation of voids in a doped polymethylmethacrylate polymer," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 2404-2406.
- 29) S. Kobayashi, K. Saito, T. Iwamura, T. Horigome, H. Yamatsu, M. Oyamada, K. Hayashi, D. Ueda, N. Tanabe and H. Miyamoto: "Introduction of volumetric optical storage technology "Micro-reflector", an ultra-multilayer optical disk," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2009*, Th-I-01 (Tokyo, 2009).
- 30) H. Yamatsu, Y. Takemoto, S. Tashiro, G. Fujita, T. Miura, T. Iwamura, H. Uchiyama and K. S. Yun: "Void type micro-reflector recording using an all-semiconductor picosecond laser," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Th-L-03 (Tokyo, 2010).
- 31) R. Katayama, S. Tominaga, Y. Komatsu and M. Tomiyama: "Three-dimensional recording with electrical beam control," *Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage (ISOM/ODS) 2008*, MB06 (Bellingham, 2008).
- 32) H. Mikami, K. Osawa and K. Watanabe: "Optical phase multi-level recording in microhologram," *Proc. SPIE*, **7730**, 77301D (Bellingham, 2010).
- 33) P. J. van Heerden: "Theory of optical information storage in solids," *Appl. Opt.*, **2** (1963) 393-400.
- 34) H. Horimai, X. Tan and J. Li: "Collinear holography," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 2575-2579.
- 35) K. Anderson and K. Curtis: "Polytopic multiplexing," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1402-1404.
- 36) A. Hoskins, B. Ihas, K. Anderson and K. Curtis: "Monocular architecture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 5912-5914.
- 37) K. Shimada, T. Ishii, T. Ide, S. Hughes, A. Hoskins and K. Curtis: "High density recording using monocular architecture for 500 GB consumer system," *Optical Data Storage Topical Meeting 2009*, TuC2 (Piscataway, 2009).
- 38) K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, Y. Okamoto, H. Mori, A. Fukumoto and K. Okada: "415 Gbit/in.<sup>2</sup> recording in coaxial holographic storage using low-density parity-check codes," *Optical Data Storage Topical Meeting 2009*, TuC3 (Piscataway, 2009).
- 39) K. Hirooka, K. Takasaki, S. Kobayashi, H. Okada, S. Akao, S. Seko, A. Fukumoto, M. Sugiki and K. Watanabe: "Development of a coaxial type holographic disc data storage evaluation system, capable of 500-fps-consecutive writing and reading," *Optical Data Storage Topical Meeting 2006*, MA4 (Piscataway, 2006).
- 40) K. Takasaki, H. Mori, S. Yamada, T. Hori, K. Hirooka, H. Okada, K. Tokuyama, M. Hara, S. Seko, A. Fukumoto and K. Okada: "Development of a coaxial-type holographic disk system with a small drive," *Optical Data Storage Topical Meeting 2009*, PD2 (Piscataway, 2009).
- 41) M. Ayres: "Coherent techniques for terabyte holographic data storage," *Optical Data Storage Topical Meeting 2010*, 7730-1 (Bellingham, 2010).
- 42) D. Koide, H. Tokumaru, T. Kajiyama, Y. Takano, N. Onagi and K. Tsukahara: "Terabytes archival storage using flexible optical disks," *International Symposium on Optical Memory (ISOM) 2010*, Th-PO-03 (Tokyo, 2010).
- 43) P. Zijlstra, J. W. M. Chon and M. Gu: "Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods," *Nature*, **459** (2009) 410-413.
- 44) M. Mansuripur, A. R. Zakharian, A. Lesuffleur, S.-H. Oh, R. J. Jones, N. C. Lindquist, H. Im, A. Kobyakov and J. V. Moloney: "Plasmonic nano-structures for optical data storage," *Opt. Express*, **17** (2009) 14001-14014.

(2011年7月11日受理)