

# 光メモリーの要素技術

前田 武志

## Elemental Technologies of Optical Memory

Takeshi MAEDA

Current optical memory has followed the trend of a combination of a short wavelength and a high NA for a long time. Recently, however, the trend has begun breaking down. Then many technologies for the future have been researched and the elemental technologies that support these future technologies have been developed. The ISOM committee made a technical roadmap toward the future for the industry and academic in 2007. When setting milestones on the roadmap, we should consider an interface specification between a future technology and an elementary technology. In this report, the elemental technologies on recent optical memory have been described based on the achievement of making the ISOM roadmap.

**Key words:** optical memory, optical disk, multi-layer, two-photon absorption, hologram, solid immersion lens, super resolution

光メモリーは、素材からアプリケーションまで幅広い産業分野に支えられて成り立っている。1970年の初頭に始まった光ビデオディスクから、これまで高解像度の光学系と短波長のレーザー光源の組み合わせによる大容量化の技術開発がCD、DVD、Blu-ray Disc、HD DVDとこれらの産業の発展を支えてきた。しかし、このトレンドがNA 0.85の対物レンズと青紫レーザーを組み合わせたBlu-ray Discの登場により、終焉を迎えつつある。新しいトレンドの確立を目指して種々の将来技術が研究開発され、これらを支える要素技術も歩調をあわせて研究開発が進んでいる。

このような状況の中、光メモリーの国際学会であるISOM (International Symposium on Optical Memory) は光メモリーの将来の指針となるロードマップを2006年に作成し、公表した。作成過程では、将来技術と要素技術の関連(インターフェース)項目と仕様値を検討しながら、マイルストーンを作成した。

本稿では新しい展開をみせる光メモリーの要素技術について、ロードマップ作成過程で得た知見をもとに報告していく。

### 1. 光メモリーの基本構成

図1に、1970年の初頭にロイヤル・フィリップス社によって考えられた光ディスクの読み出し動作原理をROMを例にとって示す。光源(半導体レーザー)から出射されたレーザー光は対物レンズによって光ディスク情報記録面上に集光される。情報記録面は厚さ1.2mmの透明プラスチック基板の光入射面とは反対側の面近くにあり、微小な凹凸の形で情報が記録されている。情報記録面には光の反射率の高いアルミニウムが蒸着されており、この面からの反射光が対物レンズを通過後、プリズムにより光路を曲げられ、光検出器に導かれる。集光された光スポットとマークとの相互作用により反射光の光学的な特性が変化して、マークの有無、すなわち情報を読み取ることができる。ディスク作製の工程は、まずフォトリジストに情報に応じて強度変調を受けたレーザー光を照射し、現像後にニッケルメッキをして凹凸の型になるスタンパーを作る。次に、スタンパーに熱可塑性樹脂を押し当てて凹凸のパターンを転写する。

図1に述べたコンセプトをもとにディスク面上の記録膜

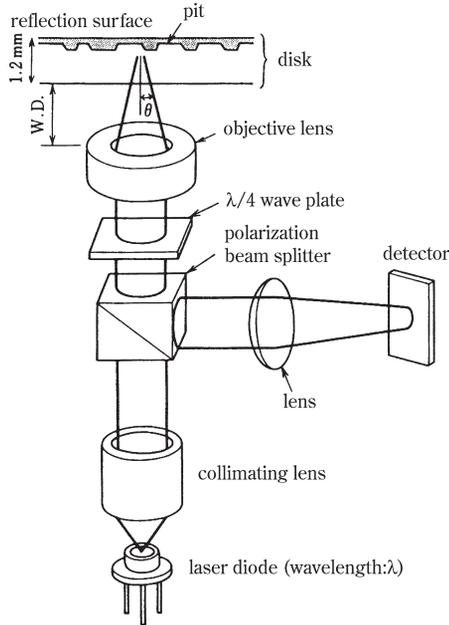


図1 光ディスク原理動作。

を替えて、情報マークを追記記録するタイプや書き換えするタイプの光ディスクが次々に研究開発されてきた。それらの光ディスクは、読み出しのコンセプトが同じであることから互換性をもつことができた。

## 2. 従来のトレンドと将来技術

高密度化のためには、対物レンズの開口数 ( $NA$ ) と光源の波長  $\lambda$  の比によって決まるスポットサイズを小さくすればよかった。しかし、Blu-ray Disc では  $NA$  を 0.85 と限界値 1.0 近くまで向上させ、波長も青紫色 405 nm と半導体レーザーで実現できる限界に近くなってきている。

これらを背景にして、ISOM の高密度に関する発表はここ 5 年近く急激に増加し、全発表件数の半分以上を占めるようになってきていた (図 2)。発表件数を分類すると、大きく矢印で示す 5 つの将来技術 (二光子吸収記録, ホログラム記録, 多層記録, 超解像再生, 近接場記録) が提案されて研究開発されていることがわかる。しかし、どれが光メモリの新しいトレンドを引っ張るか不明の状態であった。そのような状態が続くと、光メモリは裾野のひろい産業であるため、関係する産業界では時間のかかる投資や設備開発に影響が生じたり、次のアプリケーションのイメージを描けなくなってくる。ひいては、光メモリ産業全体の活力を失わせることになる懸念された。

## 3. ISOM ロードマップの作成

ISOM 実行委員会は将来技術として上記 5 つの技術について、CD サイズの容量にして現状の一步先 200 GB~1 TB まで、転送レートにして 200 Mbps~1 Gbps までのロードマップを作成し、それらをまとめることにより光メモリ全体の将来を俯瞰することとした。ISOM の実行委員、プログラム委員の中から上記 5 つの将来技術を取りまとめるオーガナイザーを指名し、各オーガナイザーが 4~5 名のその分野の専門家を選定して 2005 年 1 月からロードマップの作成に取り掛かり、2005 年 7 月の ISOM/ODS '05 に中間報告を行った。ロードマップにおいてはマイルストーンを設定し、それに至る課題とアプローチを明確にした。課題とアプローチを明確にしたのは、これまで光メモリの研究開発に携わってこなかった方々にも参入していただきたかったからである<sup>1)</sup>。

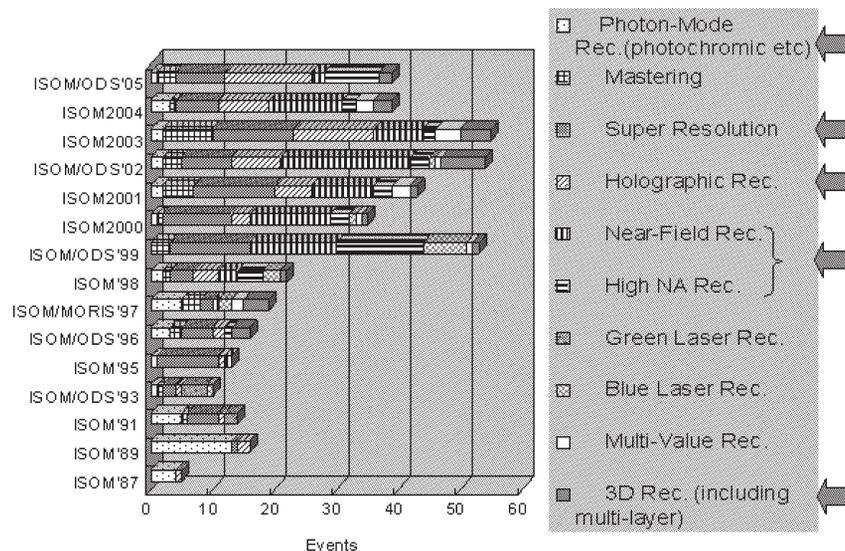


図2 JJAP (Japan Journal of Applied Physics) に掲載された高密度記録関係の発表件数の年次推移。

**We decided the interface specifications between future technologies and elemental technologies.**

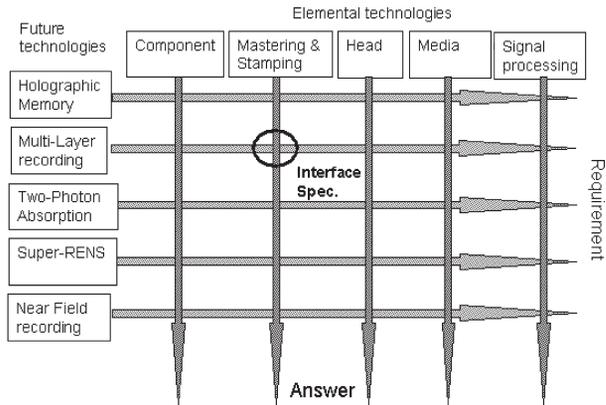


図3 インターフェース仕様を決めるときの将来技術と要素技術の関係。

**4. 将来技術と要素技術の関係**

その後、2006年の最終報告に向けて、将来技術を支える5つの要素技術（コンポーネント、媒体、ヘッド、信号処理、スタンピングおよびマスタリング）についても同様なグループを結成し、各将来技術が設定したマイルストーンを実現するために各要素技術が満足すべき技術内容とマイルストーンの達成時期について将来技術と要素技術のグループ間の議論によりインターフェース仕様（図3）として決めていった。その結果を2006年10月中旬に高松で開催したISOM '06において最終報告として発表した<sup>2)</sup>。延べ参加メンバーは56名、参加機関は30、技術グループ間での開催会議数は約50回に及ぶ、すべてボランティアによる活動である。

要素技術について、その対象とする項目について、図1の構成をもとに簡単に説明する。component（部品）は光学系を構成する光学部品（対物レンズやプリズム）や光源、検出器を開発する技術である。head（ヘッド）は対物レンズを上下、左右に動かすアクチュエーター、ディスクからの位置決め信号を検出する機構、およびこれらの信号を用いてスポットを制御するサーボ機構を開発する技術である。mastering & stamping（マスタリングとスタンピング）はスタンパーを作る技術と凹凸を転写する技術である。media（媒体）はディスクを構成するディスク基板や記録膜の開発とディスク製造方法を開発する技術である。signal processing（信号処理）は光ディスクに記録する情報の処理と光ディスクから読み出した信号から情報を取り出す技術である。

これらの要素技術は将来技術を支えるものであり、将来技術によって要求される機能や性能が異なる。しかし、共

**Outline**

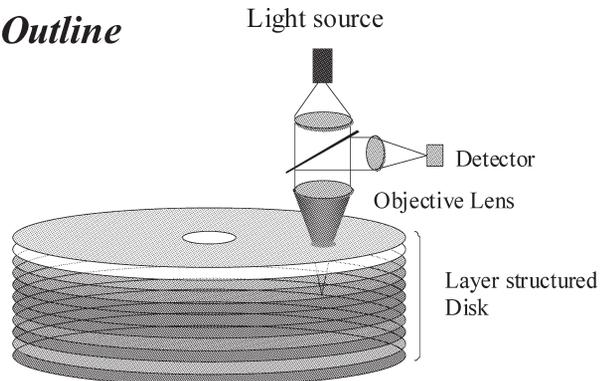


図4 多層技術の記録再生動作原理。

通の機能もあり、光ディスク全体が進歩していく中で独自に性能を進化させてきている。

**5. 将来技術**

以下、ISOMロードマップで取り上げた5つの将来技術ごとに、CDサイズのディスク当たり1TB、1Gbpsに至るマイルストーンと、それを実現する主要な課題とアプローチについて述べる。

マイルストーンはある容量と転送速度で表され、これを実現するために多くの新規技術の組み合わせが必要となる。マイルストーンが達成できたということは、その組み合わせが提示され、その組み合わせを用いた機能デモ機（スピンスタード）により、マイルストーンで示す容量と転送レートを示すことができたということである。

課題については、将来技術を研究する人たち自身が解決しなくてはならないブレークスルー技術と、要素技術を研究開発する人たちに解決を依頼しなくてはならないものの2種類がある。以下、将来技術ごとにこれらを説明していく。

**5.1 多層記録技術**

図1に示す光ディスクでは情報面はディスク当たり1層であった。DVD-ROM、Blu-ray Discでは2層まで、HD DVDでは3層まで層数を増やしている。この枚数をさらに増加させる技術である（図4）。ディスク当たりの容量は層数分増加することになるが、転送速度は1層当たりと変わらない。

現在、3つの方法が提案されている。1つは、Blu-ray Discの構造で4層から6層まで層数を単純に増加させるものである<sup>3-6)</sup>。しかし、層数を増やすと最下層に到達する光量が途中の層の影響を受けて減衰し、記録ができなくなり、再生時に反射光量が微小となり信号対雑音比が低下する。

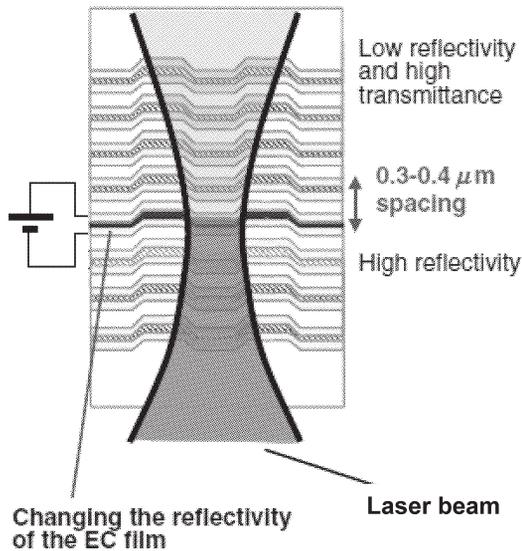


図5 層選択法の原理.

これを解決するために2つの方法が提案されている。1つは特定の層を電氣的に選択し、記録再生を行う layer selection (層選択法) である (図5)<sup>7,8)</sup>。選択されない層に記録されたマークと未記録部の光の透過率を同じにし、透過率も大きい媒体構造とする。電圧はディスク回転状態でも非接触に外部から供給する<sup>9)</sup>。この方法では原理的には何層も積層し、容量を増加させることができる。もう1つは、後から説明する two-photon absorption (二光子吸収記録法) である。

マイルストーンは、phase-1 (200 GB, 200 Mbps),

phase-2 (500 GB, 500 Mbps), phase-3 (1 TB, 1 Gbps) と3つあり、phase-1は単純多層法(6層)、phase-2は層選択法(10層)、phase-3は層選択法か二光子吸収法で実現する。図6に、各マイルストーンに至るまでの課題と解決アプローチと実現時期を示した。phase-3については後述の二光子吸収技術で述べる。

### 5.2 二光子吸収記録技術

これまでの光ディスクにおいては、記録時に記録材料が反応していたのは1光子のみであった。二光子吸収では、2つの光子を吸収して記録膜の光学的特性が変化する。この反応は光スポットが集光された光強度の強いところでしか発生しないため、多層の特定の層を焦点位置の制御のみで選択できる(図7)。また、途中の層では光強度が弱いので反応せず、透過することができ減衰量は少ない。記録されたマークの読み出し方法は、屈折率の変化や蛍光を検出することによる<sup>10-12)</sup>。

要素技術としては二光子吸収を起こす媒体<sup>13-15)</sup>と、2つの光子を吸収する確率を上げるためにフェムト秒の期間だけ高出力発振する光源<sup>16)</sup>の開発が必要となる。

図8に容量1TB、転送レート1Gbpsまでのマイルストーンと、そのときの仕様を示す。右上には各マイルストーンに達するまでに開発すべき課題を示した。

### 5.3 ホログラム記録技術

この技術の記録原理は図1に示した従来の光ディスクと異なり、光源から出た光を平行光にして二次元に配置したデータを空間変調器(SLM)により変調し、対物レンズに

Phase-1		Phase-2	
200GB 200Mbps 33GB × 6 layers		500GB 500Mbps 50GB × 10 layers	
Space layer thickness variation -> +/- 1 μm in whole layers -> implemented	200Mbps -> soon	Capacity enhancement from 33GB to 50GB -> adaptive PRML + Land & Groove -> Two Dimensional modulation (Two DOS) -> soon	
Tilt correction -> conventional	Signal processing for low SNR such as LDPC or new PRML -> soon	Contact-less Power Supply for each layer -> soon	
High power LD over 200mW -> 2007	Layer crosstalk reduction -> polarization plate -> implemented	500Mbps->Multi-beam -> 3 beams emission LD -> 2010-2012	Multi-track mastering -> soon
Aberration correction over 80 μm (15μm × 5 intermediate layers) -> implemented	High hardness substrate -> soon	High transmittance & low absorbance material -> 2008-2012	
High throughput Multi-layer fabrication process -> 2007		No need to consider the space layer thickness variation	
		Low amp. noise detector -> soon	

図6 多層記録技術の課題とアプローチ.

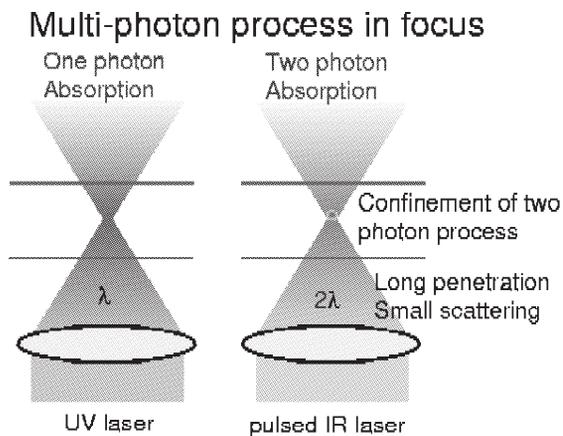


図7 二光子吸収記録法の原理。

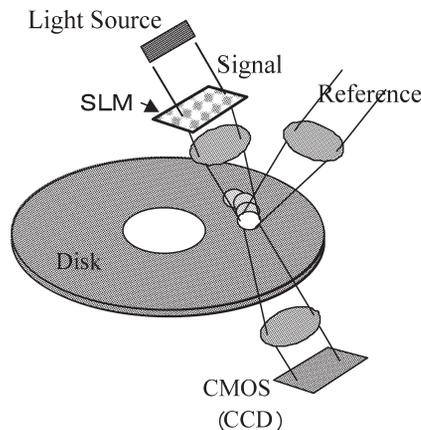


図9 ホログラム記録の原理。

### Data transfer rate

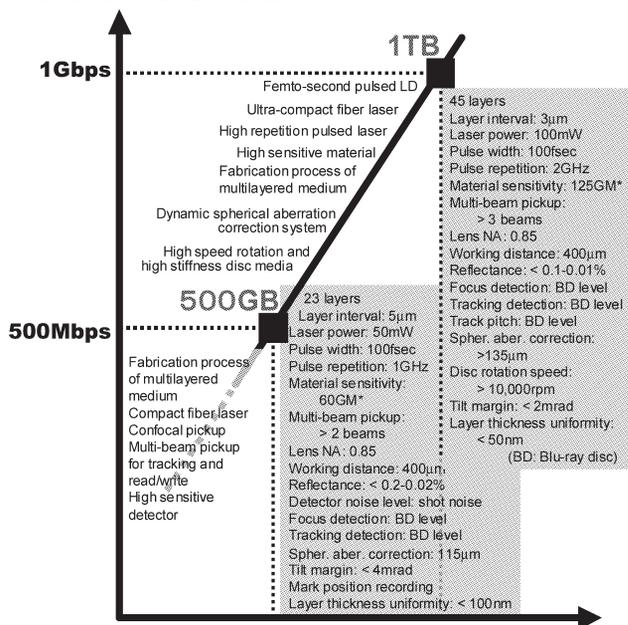


図8 二光子吸収記録法のロードマップ。

### Capacity

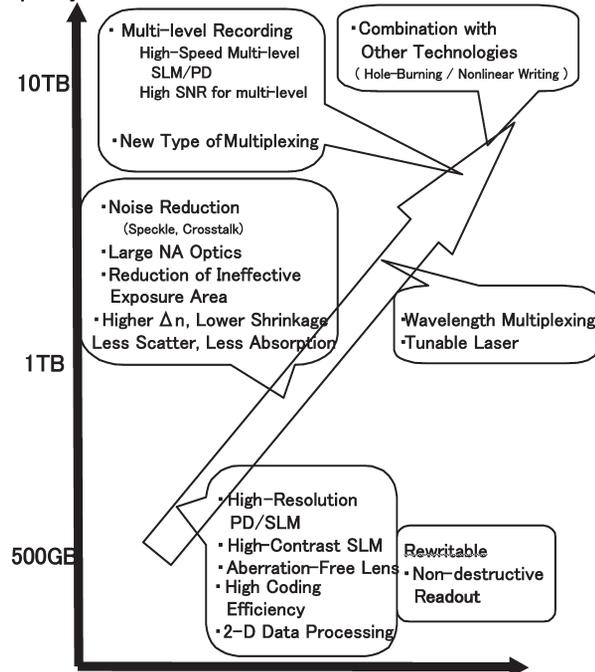


図10 ホログラム記録における容量増加の課題とアプローチ。

よりディスク面に照射する。同時に無変調の参照光を照射し、ディスク上で干渉させ、1つのホログラムを干渉パターンとしてディスクに記録する。再生するときには参照光を照射すると、ディスク上に記録された干渉パターンにより回折され、二次元データ像が再生される。再生像を二次元のアレイ光検出器により検出する(図9)<sup>17)</sup>。

1つのホログラムで記録できるデータ量は少ないが、記録層を厚くすることにより、特定の領域に多重にホログラムを記録でき、さらに記録領域をシフトして重なりあった部分からもホログラムが再生できる媒体が開発されたことにより、飛躍的に記録容量を増大することができるようになった<sup>18-22)</sup>。

図10と図11に、ホログラム記録において、容量と転送

速度を増加させるための課題とアプローチをまとめた。従来の光ディスクとは記録再生原理が異なるために、要素技術は新規に研究開発を必要とするものが多くある。たとえば、二次元空間変調器、二次元アレイ光検出器、ホログラム記録媒体である。特に、記録媒体は二次元光強度のパターンを線形に多重記録し、かつデータ記録媒体に求められる信頼性を満足する必要がある。追記型では、フォトポリマー材料を用いたものが日米で熱心に開発されている<sup>21)</sup>。表1には、最重要課題である記録材料について将来技術から要求される仕様値をまとめた。

### 5.4 近接場記録技術

対物レンズの開口数は1が限界であるが、これを超えて

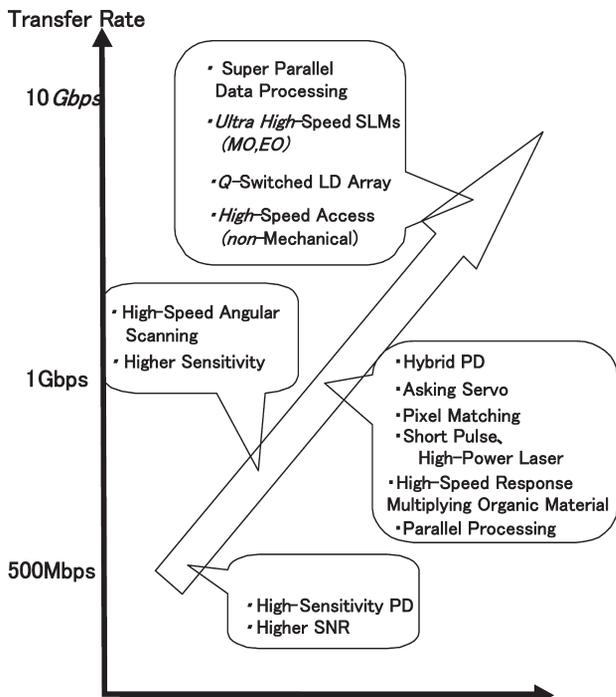


図 11 ホログラム記録における転送速度増加の課題とアプローチ。

さらに微小スポットを実現する方法である。このために従来の対物レンズの先にもうひとつ屈折率が高く、絞り込み角度を大きくできる SIL (solid immersion lens) を取り付ける (図 12 を参照)<sup>23,24)</sup>。実効的な開口数は、SIL の屈折率の 2 乗倍大きくできることから 2.0 付近の値が得られる。その代わりに、ディスクとレンズの間隔 (ギャップ) を 20~30 nm の微小間隔に 2 nm 程度の精度で維持することが必要となる<sup>25,26)</sup>。

したがって、要素技術としては、SIL とギャップ制御系、微小マークのマスタリングとディスク表面加工<sup>27,28)</sup> が重要となる。SIL では屈折率の高い材料を用い、ディスク傾斜

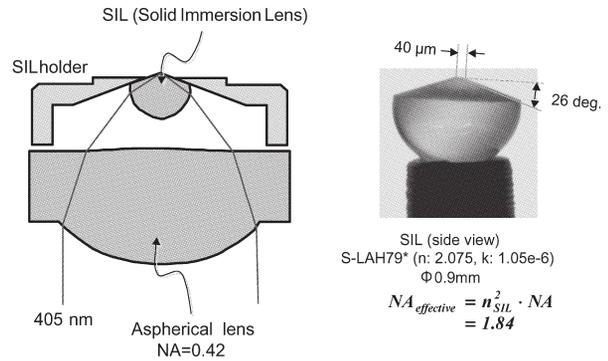


図 12 SIL の構造とレンズ形状。

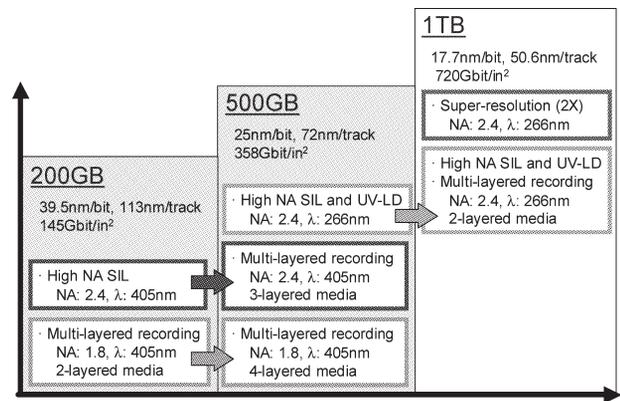


図 13 近接場記録の容量のロードマップ。

しても衝突しない形状に加工することが求められる。ギャップ制御系では微小間隔でも追突しないように SIL をゆっくりディスクに近づけ、回転数が大きくなっても追従特性が劣化しない高い剛性が必要となる。微小マークを作製するために、本特集の高森氏の解説にあるマスタリング技術と EB (electron beam) を用いた技術が開発されている。

図 13 に容量のロードマップを、表 2 に容量を増加させ

表 1 ホログラム記録におけるマイルストーンごとに追記記録型、書き換え型記録媒体に要求される仕様。(条件: 120 mm ディスク直径)

記録タイプ	容量	200 GB	500 GB	1 TB	10 TB
追記型と書き換え型共通	転送速度	200 Mbps	500 Mbps	1 Gbps	10 Gbps
	波長	532 nm	405 nm (532)	405 nm	350 nm (405)
	記録感度 [cm/mJ]*	>0.2	>0.3	>0.5	>1
	ダイナミックレンジ	M#>25	M#>35	M#>50	M#>100
	散乱 [Srad <sup>-1</sup> ・μm <sup>-1</sup> ]	<1×10 <sup>-6</sup>	<5×10 <sup>-7</sup>	<3×10 <sup>-7</sup>	<1×10 <sup>-7</sup>
	記録膜厚さ	>500 μm	700 μm	1.0 mm	>1.5 mm
	動作温度	10~40°C	←	0~60°C	←
	非動作温度	-20~60°C	←	-20~80°C	←
	アーカイブ寿命	>10 yrs.	←	←	←
	シェルフ寿命	>1 yr.	←	←	←
	追記型のみ	シュリンク	<0.1%	←	←
読み出し回数		>10 <sup>4</sup> 回	←	←	←
書き換え型のみ	非破壊読み出し	←	←	←	←

\*0.8×M#/(I×t) ここで I は強度 [mJ/cm<sup>2</sup>], t は記録膜厚さ [cm]。

表2 近接場記録の容量増加の課題とアプローチ。

高 NA SIL	高屈折率材料 ( $n > 2.5$ ) 超半球 SIL 高精度加工
UV 光 SIL	ダイヤモンド SIL ( $n > 2.5$ ) と UV 光用光学素子 高硬度 SIL の高精度加工
カバー層	UV 用高屈折率と 高透過率の物質 SIL の接触に対応した表面粗さと硬度 球面収差低減のための均一な厚さ
記録媒体	SIL 接触に対する塵埃と欠陥対策 微小マークの安定記録 ( $\sim 25$ nm マークサイズ) 防塵用カートリッジと光ピックアップ取り付け 2~4 層の多層構造設計と製造方法
基板	微小ギャップに対応した表面粗さ (Gap: $\sim 25$ nm) 微小傾きと高剛性 (SIL tilt: $< \sim \pm 0.1$ deg)
信号処理	塵埃と欠陥に耐性のある信号処理 光学伝達特性の劣化に対応 (残留ギャップ誤差: $< \pm 5\%$ )

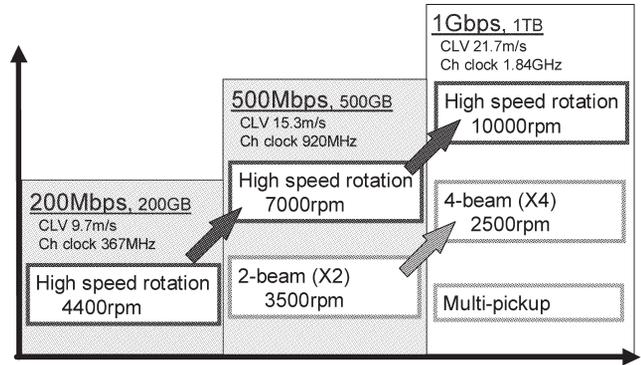


図14 近接場記録の転送速度のロードマップ。

るための課題とアプローチについてまとめた。図14に転送速度のロードマップを、表3に転送速度増加のための課題とアプローチについてまとめた。

### 5.5 超解像および super-RENS 技術

超解像は、読み出しスポットとマーク間の光学的な作用をスポットサイズよりも微小な領域に限定することにより、解像度を実効的に上げるものである。日本で考案された super-RENS (super-resolution near-field structure) は、世代ごとに光学的な作用原理と領域を変えて検出信号強度を増加させてきた (図15)。最初はスポット内に微小開口を作り、マークを読み出すタイプであった<sup>29)</sup>。次にプラズモン共鳴する粒子により強い発光強度をもつ領域を発生し、マークを読み出すタイプになった<sup>30)</sup>。さらに、バブル状マークによる局所的な強い応力と照射温度の上昇による相変化膜の特性の変化を用いて読み出すタイプである<sup>31)</sup>。

現在の光ディスクの読み出し系が、ディスクを変えるだ

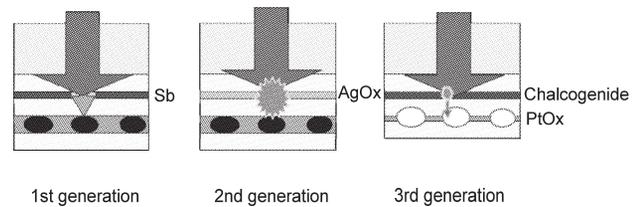


図15 super-RENS の読み出し原理の変遷。

けでそのまま使える方法である。ただし、読み出し原理によっては、超解像効果による信号と通常の解像度で得られる信号が混在することがあるので、要素技術としては超解像効果を表す媒体の研究開発と、これら进行处理する信号検出処理技術とを常に一緒に研究開発する必要がある<sup>32-34)</sup>。また、従来の光ディスクと読み出し原理が異なることから、従来のトラッキング検出方式の適用が難しく新規検出方式を開発しなくてはならない<sup>35)</sup>。

図16に、超解像のロードマップと課題、およびアプローチについてまとめて示す。

### 6. ロードマップの活用について

将来技術ごとにロードマップを示したが、マイルストーン

表3 近接場記録の転送速度増加の課題とアプローチ。

高速回転	高速回転におけるギャップ制御 (10000 rpm) 高帯域制御と学習サーボ 小型光ピックアップ
マルチビーム	集積型マルチレーザー (2~4 ビーム) マルチスポットのレイアウト (クロストークとクロス記録) マルチスポット制御と信号検出 (ギャップ制御, トラッキング)
媒体	マルチビーム用マスタリング (螺旋溝/同心円溝) 微小上下変動と傾き (ギャップ制御のマージン) マルチビームのためのデータとアドレスの配列
SIL-媒体インターフェース	ダイナミック傾き制御 (機械的 SIL 傾きマージン $< \pm 0.1$ deg) 衝撃の検出と吸収 (Gap $\sim 25$ nm)
信号処理	高速度信号処理 (1 Gbps) マルチビーム用並列信号処理 (2~4 ビーム)

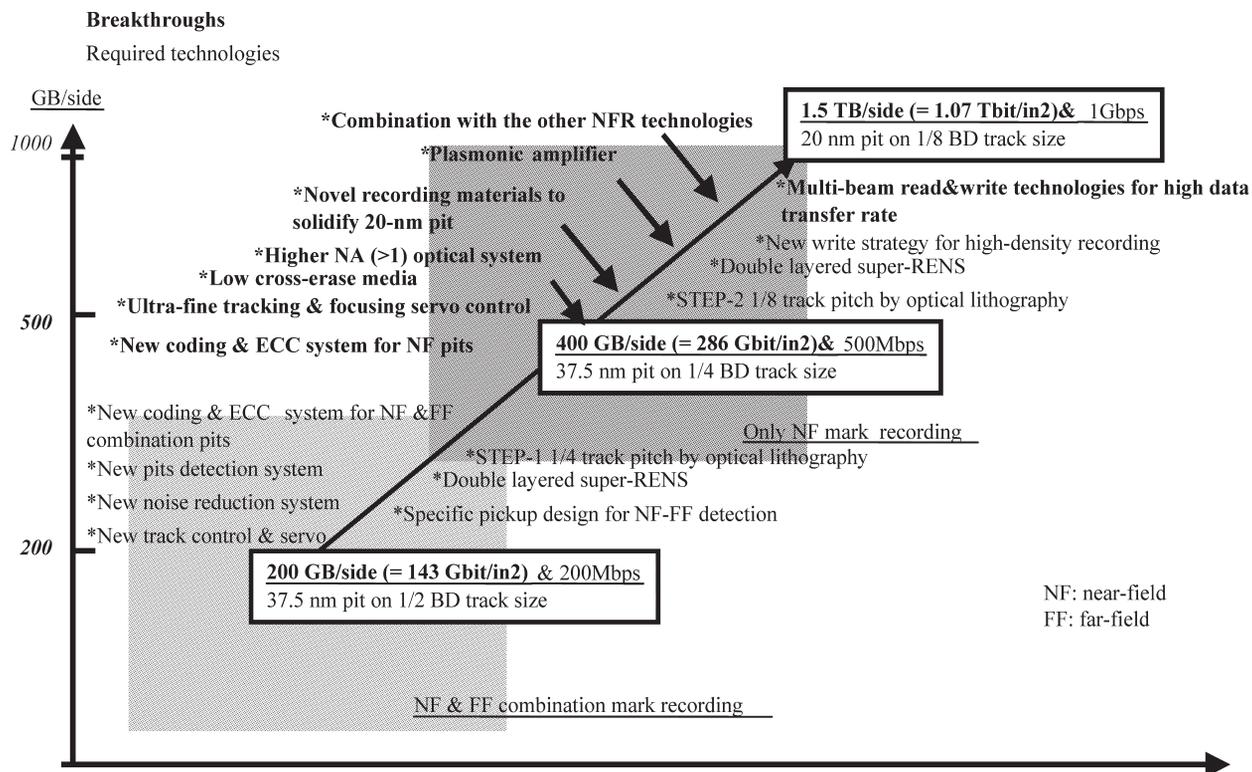


図16 super-RENSのロードマップ。

ンの実現時期については、将来技術によらずほぼ同じ時期になっているので省略した。容量で200~300 GBの実現時期は2007年から2008年、500 GBは2010年から2012年、1 TBは2013年から2015年となっている。

光ディスクに関連する業界では、ロードマップを設備投資やアプリケーション開発などの指針として活用していただきたい。研究開発をしている人たちには、各将来技術において述べた課題解決にチャレンジするか、今提案されている将来技術の課題を乗り越える技術を生みだし、ロードマップの実現時期を早めてもらいたい。すでに、その取り組みがなされている<sup>36,37)</sup>。ロードマップは常に書き換えられていくものである。

ここで紹介したISOMロードマップの最終報告は、将来技術と要素技術をあわせて約100ページの冊子にまとめられ、ISOMのホームページ <http://www.isom.jp> (2007年12月10日現在) にて購入の受付を行っている。

## 文 献

- 1) 前田武志：“ISOMロードマップの必要性と光メモリの将来”，ISOM2005講演会資料(2005) pp. 60-71.
- 2) T. Maeda：“Making the ISOM optical memory roadmap,” *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, We-NS-01 (2006) pp. 112-113.
- 3) N. Shida, T. Higuchi, Y. Hosoda, H. Miyoshi, A. Nakano

- and K. Tsuchiya：“The BD-type multi-layer 100 GB ROM disk using the photopolymer sheet,” *International Symposium on Optical Memory 2003 (ISOM '03) Technical Digest*, Tu-B-04 (2003) pp. 10-11.
- 4) I. Ichimura, G. Hashimoto, K. Saito, T. Yamazaki, T. Yukumoto, T. Maruyama and K. Osato：“Proposal for multi-layer Blu-ray Disc structure,” *International Symposium on Optical Memory 2004 (ISOM '04) Technical Digest*, We-E-02 (2004) pp. 52-53.
- 5) 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*, **6282** (2006) 62820I-1-62820I-11.
- 6) I. Ichimura, T. Maruyama, J. Shiraishi and K. Osato：“High-density multilayer optical disc storage,” *Proc. SPIE*, **6282** (2006) 628212-1-628212-8.
- 7) K. Kojima and M. Terao：“Investigation into recording on electrochromic information layers of multi-information-layer optical disk using electrical layer selection,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 7058-7064.
- 8) A. Hirotsune, M. Mukoh, Y. Fujita, Y. Amano, T. Maeda and M. Terao：“Layer-selection-type recordable optical disk for 1-TB capacity,” *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Mo-B-04 (2006) pp. 12-13.
- 9) Y. Fujita, A. Hirotsune and Y. Amano：“Feasibility study on contactless power for layer-selection-type recordable multi-layer optical disk,” *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Mo-C-03 (2006) pp. 26-27.
- 10) S. Kawata, T. Tanaka, Y. Hashimoto and Y. Kawata：“Three-dimensional confocal optical memory using photo-refractive materials,” *Proc. SPIE*, **2042** (1994) 314-325.

- 11) S. Kawata and Y. Kawata: "Three-dimensional optical data storage using photochromic materials," *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1777-1788.
- 12) T. Shiono, T. Itoh and S. Nishino: "Two-photon absorption recording in photochromic diarylethenes using laser diode for three-dimensional optical memory," *International Symposium on Optical Memory 2004 (ISOM '04) Technical Digest*, We-E-04 (2004) pp. 56-57.
- 13) T. Tanaka, K. Yamaguchi and S. Yamamoto: "Rhodamine-B-doped and Au(III)-doped PMMA film for three-dimensional multi-layered optical memory," *Opt. Commun.*, **212** (2002) 45-50.
- 14) M. Akselrod, S. Orlov and G. Akselrod: "Bit-wise volumetric optical memory utilizing two-photon absorption in aluminum oxide medium," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 4908-4911.
- 15) O. Alpert, A. Shipway, Y. Takatani, K. Nakao, O. Eytan, D. Leigh and M. Arise: "Dynamic two-photon recording and readout of over 100 layers of data," *International Symposium on Optical Memory 2007 (ISOM '07) Technical Digest*, Tu-G-04 (2007) pp. 76-77.
- 16) M. Tsuji, N. Nishizawa and Y. Kawata: "Compact and high-power mode-locked fiber laser for three-dimensional optical memory," *International Symposium on Optical Memory 2007 (ISOM '07) Technical Digest*, Tu-F-05 (2007) pp. 66-67.
- 17) H. J. Coufal, D. Psaltis and G. T. Sincerbox (ed.): *Holographic Data Storage* (Springer, New York, 2000).
- 18) K. Anderson and K. Curtis: "Polytopic multiplexing," *Opt. Lett.*, **29** (2004) 1402-1404.
- 19) H. Horimai and X. D. Tan: "Advanced collinear holography," *Opt. Rev.*, **12** (2005) 90-92.
- 20) 志村 努 (編): *ホログラフィックメモリーのシステムと材料* (シーエムシー出版, 2006).
- 21) K. Curtis: "Holographic professional archive drive," *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Mo-D-01 (2006) pp. 34-35.
- 22) K. Tanaka, H. Mori, M. Hara, K. Hirooka, A. Fukumoto and K. Watanabe: "High density recording of 270 Gbits/inch<sup>2</sup> in a coaxial holographic storage system," *International Symposium on Optical Memory 2007 (ISOM '07) Technical Digest*, Mo-D-03 (2007) pp. 38-39.
- 23) M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, A. Nakaoki, M. Furuki, M. Takeda, M. Yamamoto, T. J. Schaich, B. M. 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.*, **45** (2006) 1311-1313.
- 24) M. Shinoda, K. Saito, T. Kondo, M. Furuki, M. Takeda, A. Nakaoki, M. Sasaura and K. Fujiura: "High-density near-field readout using solid immersion lens made of KTaO<sub>3</sub> monocrystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 1332-1335.
- 25) T. Ishimoto, K. Saito, M. Shinoda, T. Kondo, A. Nakaoki and M. Yamamoto: "Gap servo system for a biaxial device using an optical gap signal in a near field readout system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 2719-2724.
- 26) J. Lee, M. Aa, C. Verschuren, F. Zijp and M. Mark: "Development of an air gap servo system for high data transfer rate near field optical recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 3423-3426.
- 27) C. Verschuren, F. Zijp, J. Eerenbeemd, M. 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.*, **44** (2005) 3554-3558.
- 28) C. Verschuren, J. Eerenbeemd, F. Zijp, J. Lee and D. Bruls: "Near-field recording with a solid immersion lens on polymer cover-layer protected discs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) 1325-1331.
- 29) J. Tominaga: "Optical near-field properties from phase change films—new proposal and basic experiment for optical near-field data storage," *International Symposium on Optical Memory 1998 (ISOM '98) Technical Digest*, Th-O-01 (1998) pp. 148-149.
- 30) T. Shima, T. Nakano and J. Tominaga: "Effect of SiO<sub>2</sub> addition to PtO<sub>x</sub> recording layer of super-RENS disc," *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Mo-B-02 (2006) pp. 8-9.
- 31) J. Tominaga, P. Fons, S. Petit, T. Shima, K. Kurihara, Y. Yamakawa, T. Nakano and A. Kolobov: "Optical near-field focusing in super-RENS thin film," *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Tu-G-02 (2006) pp. 86-87.
- 32) J. Kim, J. Bae, I. Hwang, J. Lee, H. Park, C. Chung, H. Kim, I. Park and J. Tominaga: "Error rate reduction of super-RENS disc," *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Mo-B-01 (2006) pp. 6-7.
- 33) T. Kikukawa, N. Fukuzawa and T. Kobayashi: "Low frequency noise reduction of super-resolution near-field structure disc with platinum-oxide layer," *International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 2005 (ISOM/ODS '05) Technical Digest*, ThC3 (2005).
- 34) J. Bae, J. Kim, I. Hwang, H. Kim, J. Lee, H. Park, I. Park and J. Tominaga: "Error rate improvement of super-RENS random signal with the minimum mark length of 75 nm in 405 nm, 0.85 NA System," *Proc. SPIE*, **6282** (2006) 628217-1-628217-6.
- 35) K. Kurihara, Y. Yamakawa, T. Shima, T. Nakano and J. Tominaga: "Group track structure super-RENS ROM disc for increasing the capacity along the radial direction of the disc," *International Symposium on Optical Memory 2006 (ISOM '06) Technical Digest*, Tu-F-02 (2006) pp. 64-65.
- 36) K. Saito, T. Horigome, H. Miyamoto, H. Yamatsu, N. Tanabe, K. Hayashi, G. Fujita, S. Kobayashi, T. Kudo and H. Uchiyama: "Drive system and readout characteristics of micro-reflector optical disc," *Optical Data Storage 2007 (ODS' 07) Technical Digest*, MB1 (2007).
- 37) T. Shintani, S. Eto, H. Minemura and Y. Anzai: "Perspectives of normal-resolution cross-talk cancellation to reduce random data bit error rate in super-resolution readout," *International Symposium on Optical Memory 2007 (ISOM '07) Technical Digest*, Tu-G-03 (2007) pp. 74-75.

(2007年12月14日受理)