

高密度光記録の研究開発動向

三 橋 慶 喜

DVR という用語がよく用いられるようになった。1996 年秋に登場した DVD は広がりを見せている。パソコンの新製品のすでに 40%以上は DVD-ROM ドライブを内蔵しているといわれている。2000 年 3 月には PlayStation 2 が発売されて話題となった。

DVR とは digital video recorder のことで、DVD-RAM (DVD-random access memory; 記録消去書き換え可能光ディスク) の次々世代機種に相当しよう。記録消去書き換えのできる光ディスクであり、現在実用化している DVD-RAM の記録容量が 2.6 GB であるのに対して、1 桁以上高い記録容量を実現することが想定されている。光ディスクの直径は 120 mm を踏襲すると思われるので、記録密度も 1 桁近く高める必要がある。

磁気ハードディスク (HD: hard disk) の記録密度が猛烈な勢いで増大していて、光ディスクは必要かという問いもある。これに対して光ディスクは read-only, write-once, rewritable と異なる機能の光ディスクを同一ドライブで使用できる強みがあり、HD には負けない応用システムが構築できる。

ここでは、2000 年 5 月にカナダで開催された、ODS (Optical Data Storage) 会議での発表を中心に、高密度光記録の技術動向を紹介する。本特集号での解説記事¹⁾、その他^{2,3)}で示された内容の多くは省略する。光ディスク技術の中で、光学に関連が大きいピックアップに関連して、光ディスク基板の透明層の厚さに注目した光ディスクの概念についての整理を行い、その動向を重点に述べる。また、DVR やホログラフィーなどの将来技術の開発動向について紹介する。

1. CD から DVD へ

表 1 に DVD と CD (compact disk) の比較を示す。CD の誕生以来 14 年を経て、1996 年秋に DVD が発売された。CD は LP レコードを駆逐した。数年前にはステレオ装置の過半数に minidisk (MD) の録再プレイヤーが内蔵されるようになった。光ディスクは一般の生活に大きく根付いている。

特筆すべきことは、ここ数年の CD-R (CD-recordable) の生産数量が毎年倍増という急進展をみせていることである。2000 年の CD-R 生産量は 30 億枚を超えるとの予測もある。これだけの成功は、パソコンに CD-ROM (CD-read only memory) が不可欠となり、CD-ROM ドライブはどこにでもあるという状況が実現したことが大きく寄与している。フロッピーディスク数枚には入りきれないファイルデータを持ち運んだり郵送するには、CD-R が安くて使いやすいという理由である。

調査会社の藤原ロスチャイルドによると、CD-ROM の普及後、その記録容量に匹敵する記録可能ドライブ (CD-R) が約 3 年遅れて立ち上がったという。このリードオンリードライブの普及、そして記録型ドライブの 3 年遅れの普及という図式は DVD にも当てはまるであろう。

CD-ROM, CD-R の普及のかけにはユーザーニーズに合わせて、データ転送速度の高速度化が要請され、X (エックス: 2, 4, 8, ..., 40) 倍速ドライブの開発が行われた。これには半導体レーザー出力の高出力化、超小型光ピックアップの開発、CLV (constant linear velocity) モード媒体の CAV (constant angular velocity) モード再生や信号処理技術などの多くの努力が積み重ねられた。

さて、表 1 をみるまでもなく、CD も DVD も外径は同じ 120 mm である。光ディスクの全体の厚さも同じである。これらは、互換性の確保という強いニーズとともに、

科学技術振興事業団横山液晶微界面プロジェクト (〒300-2635 つくば市東光台 5-9-9)
E-mail: ymitsuha@nanolc.jst.go.jp

表1 DVDとCDの比較.

項目	DVD	CD	備考・倍率
ディスクの直径 (cm)	12	←	
基板の厚さ (mm)	0.6	1.2	2枚合わせ
基板材料	ポリカーボネート	←	
チルト (mrad)	3	5	
記録容量	4.7 GB (8.54) GB 1.46 (2.66) GB	650 MB	7.23 2層ディスク 8 cm ディスク
光源の波長(λ) (μm)	0.65	0.78	1.44
レンズ開口数(NA)	0.6	0.45	1.78
S=λ/NA (μm)	1.083	1.733	スポットサイズ
トラックピッチ (μm)	0.74	1.6	
トラックピッチ/S	0.683	0.923	1.35
最短記録波長 (μm)	0.4 (0.44)	0.9	
ビットサイズ/S	0.369	0.519	1.4
回転モード	ZCLV	CLV	
変調方式	8/17	8/16	1.06
誤り検出符号	RS-PC	RS	
誤り訂正冗長度 (%)	15.40	31	1.24
データエリア	24/58	25/58	
内周の拡大			1.02
データ転送速度	12 Mbps	150 kbps	高速化
動画記録時間 (分)	135		MPEG-2 圧縮
サブピクチャー	32 stream		字幕情報ほか
音楽 (分)	135	75	特殊再生なし
チャンネル数	5.1	2	Dolby AC-3
言語	8 stream		マルチ言語対応
コントロールトラック	あり	なし	互換性, IPR ほか
ケース	なし (ROM) あり (RAM)	← なし (R, RW)	

注) ZCLV: zoned constant linear velocity, CLV: constant linear velocity, RS-PC: Reed Solomon-product code, RS: Reed Solomon, MPEG-2: motion picture expert group-2, ROM: read only memory, RAM: random access memory, R: recordable, RW: rewritable.

生産設備機器の共通化も可能にする点で、光ディスク産業にとって重要な事項である。

DVDはCDに比べて記録密度は約8倍増大した。これには、本「光学」誌の対象とする光エレクトロニクス技術の貢献が大きい。すなわち、半導体レーザーの短波長化と高NAレンズの実用である。もちろん、LSIの開発を含む信号処理技術の貢献も大きいですが、ここでは記述を省略する。

すばらしいDVD技術の例としてこれから登場が待たれるDVD-audioの仕様を図1で説明する。これまでのCDに比較しサンプリング周波数と量子化レベルが増大した。これにより、スピーカーあるいはリスニングルームなどの再生装置を考慮に入れなければ、自然界で実存する音域を超える再生が原理上可能となった。

DVDのさらなる発展のためには、記録型DVDの規格統一が望まれる。これまで、ケースあり、信頼性重視(パソコンとの共用)のDVD-RAM陣営に加えて、ケースなしのDVD-RW、またDVD-RAMに対抗する+RW方式などの規格が制定された。このことはかつてのVHS対ベ

Sampling rate: 48/96/192 kHz
44.1/88.2/176.4
Depth: 16/20/24 bits
Bit rate: 9.6 Mbps max
No. of channels: 6

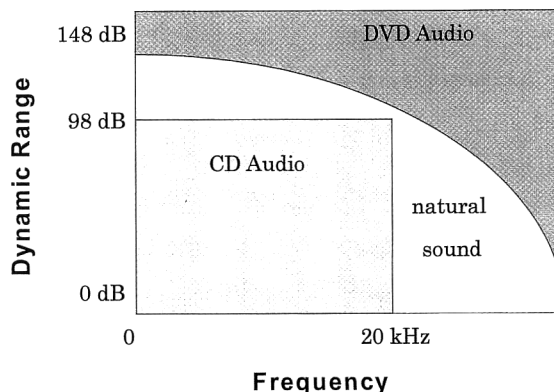


図1 DVD-audioの仕様.

ータのVTR戦争の二の舞になる、ユーザーを混乱させると非難され、業界の節度ある対応が要望されてきた。新聞報道によると⁴⁾、解決の道が少し開けてきたという。DVDフォーラムの発表⁵⁾では、DVDマルチというロゴがつけ

表2 光ピックアップ関連規格の推移 (標準化特性)

光ディスク	CD	90 mm MO (1×)	130 mm MO (8×)	DVD
基板の厚さ (mm)	1.2±0.1	1.2±0.05*	1.2±0.05*	0.6±0.03*
基板の傾き	<1° 36'	5 mrad	2.8 mrad	0.8°:r 0.3°:t
波長 (λ) (nm)	780±10	780+15~10	685±10	650±5
開口数 (NA)	0.45±0.01	(0.55)	(0.55)	0.6±0.01
λ/NA (μm)	—	1.423±0.023	1.245±0.018	—
フィリング光強度 D/W	—	1.0	0.85±0.05	—
中心部光強度	50%	—	—	60~70%:r 90%:t
波面収差 ΔW	—	λ ² /180	λ ² /330	—
rms ΔW	0.07λ	(0.075λ)	(0.055λ)	0.033λ

注) MO: magneto-optic disk (光磁気ディスク), NA: numerical aperture, D: レンズ開口半径, W: ビームウェスト, r: radial (半径方向), t: tangential (接線方向), * 波長に依存している計算式がある。

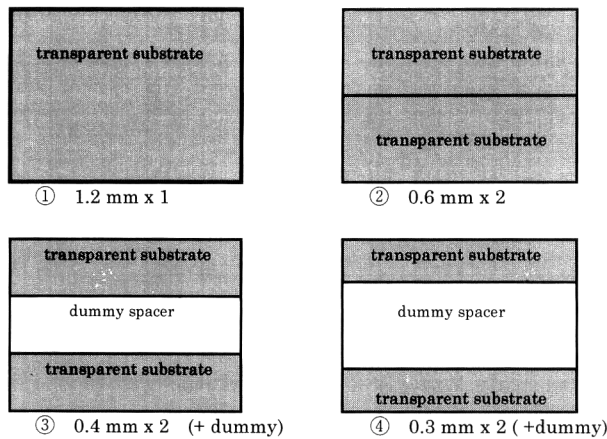


図2 光ディスクの概念その1, 透明基板: 厚さの検討。① CD, ② DVD, ③ Samsung⁸⁾, ④ LG⁹⁾。

られた機器では再生に関しては互換性をもたせるという。冒頭に紹介した DVR はこれらを統一する実体になるのだろうか。

2. 光ディスクの概念

2.1 基板厚さ 1.2 mm

DVDのさらなる発展を支えるためには、次世代のDVDを市場に投入することが必要である。記録型のDVD-RAMは当初、DVD-ROMより容量の少ない2.6 GB媒体が販売され、2000年になって4.7 GBの製品が登場した。パソコンの外部記憶装置の容量は、多くの例では倍増、倍増という形が取られてきた。次世代DVD-RAMがVTRからの置き換えを実現するためには、2倍容量ではなく約3倍以上が必要となろう。TV動画の記録ではROMと異なり平均のデータ転送速度を常に高く保つ必要がある。そのため、2~3時間の記録時間を確保するには記録容量15 GB以上が必要と考えられている。

図2に光ディスクの概念その1を示す。これは、これまでの光ディスク技術との互換性を考えた概念である。表2

表3 光学的再生特性に影響を与えるパラメーター

球面収差	∝	NA ⁴ · Δt
コマ収差	∝	NA ³ · t
焦点深度	∝	λ/NA ²
スキュー	∝	λ/t · NA ³
スポット径	∝	λ/NA

λ: 光波長, NA: レンズ開口数, t: 基板厚さ, Δt: 厚さ変動。

には光ピックアップ関連規格の推移 (標準化特性), 表3には光学的再生特性に影響を与えるパラメーターをそれぞれ示す。

光ディスクの高密度化に対応して、高NAレンズの採用、レンズ収差のより厳しい規格が制定されているのがわかる。また、基板のチルト (傾き) もより小さな値に規格仕様が制定され、DVDでは半径方向と接線方向では異なる値になっている。これらは、より厳しい値が望ましいピックアップ・ドライブ側の要請と、安価に大量の基板を供給する側の技術と、生産歩留まりの関係で決められている。チルトだけではなく、基板の全体厚さや、その変動がレンズに収差をもたらし、NAが大きいほどそれらの影響が大きい。このため、薄い基板の採用が検討されてきた。薄い基板のデメリットは2つ、チルト角の増大 (基板のたわみ) と、リムーバビリティ (情報互換性・可搬性) を弱めることである。透明基板が厚いほど、ほこりや指紋の付着、傷などに強いことはよく知られている。これが光ディスクにとって最も重要な技術・発明である。

CDの1.2 mm基板厚さに対して、その半分の0.6 mmの基板厚さを用いた光ディスクの検討は相変化光ディスクで行われ⁶⁾、国際標準化機構 (ISO/IEC: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION/International Electrotechnical Commission) には1995年1月に提案された⁷⁾。DVDではこれらの技術が生かされている。薄い基板でチルトに弱い欠点は、2枚合わせにすることで克服し、ほこりなどに弱くなる欠点は、

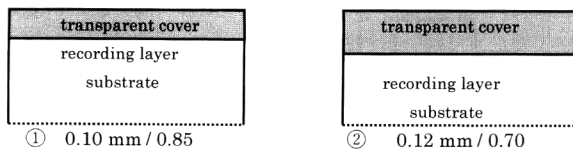


図3 光ディスクの概念その2, 透明カバーとレンズNAの検討. ① SONY¹⁰⁾, ② 日本ビクター¹¹⁾.

半導体技術の進歩による強力な信号処理を採用して解決した。

次世代のDVDでは、現在より大きなNAのレンズが望まれるので、収差発生を少なくするためには、透明基板厚さをより薄くすることが考えられる。この観点から、韓国のSamsung社⁸⁾とLG社⁹⁾は、それぞれ0.4mm、0.3mmの基板厚さを提案していて注目される(図2参照)。2社の提案はいずれも、光ディスク全体の厚さは1.2mmとなるように中間層の厚さを変えている。2000年5月開催のOptical Data Storage 2000国際会議(2000年5月14日~17日, Whistler, Canada, 以下ODS 2000と略)では、Samsung社は、0.4mmの透明基板に2層の記録層を配置し、各層当たり13.5GB、2枚の基板、合計4層で54GBを実現した。青色光源(405nm)、レンズNA0.6である。一方、LG社では青色光源(405nm)、レンズNA0.65を用いて、片面15GBを実現した。変調ウォブルアドレス法(modulated wobble addressing method)を採用している。さらに新しい変調方式である、(1, 8) RLL APLA(1, 8 run length limited alias partial look-ahead)を用いることで片面18GB(トラックピッチ0.35 μ m, ビット長0.24 μ m)が可能と述べた。これらは、DVRの候補技術である。

2.2 透明カバーとレンズNA

図3は光ディスクの概念その2を示す。透明層は非常に薄く、基板というよりはカバーである。

SONYでは高NAレンズを用いてリムーバビリティを確保するため、透明層厚さを0.1mmとする提案を1996年のISOM/ODS'96(International Symposium on Optical Memory/Optical Data Storage 1996)で行い、この技術の開発を進めている^{10,11)}。透明層は、誘電体のスパッターで作成するか、張り付け作成している。高NAレンズは2エレメントで作成され、報告によれば、波長: 405nm, NA: 0.85, 非球面数: 3, 開口: 3mm, 作動距離: 0.14mm, 重量: 62mg, rms収差: 0.032 λ である。相変化光ディスクにおいて、データ転送速度35Mbps, 記録容量22GBを実現している。将来的には2層にして50GBを目標としている。この概念とデバイスはその他の機関でも試用されている。

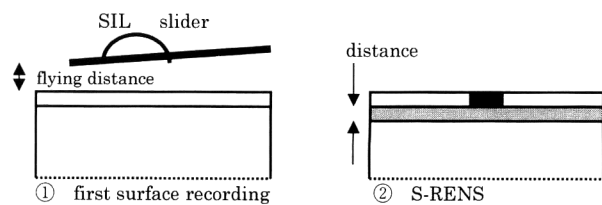


図4 光ディスクの概念その3, 近接場光記録. ① 浮上距離. TeraStor: ~100nm, 日立¹⁶⁾: ~50nm, ② 層間距離. 融合研¹⁵⁾: ~40nm.

一方、日本ビクターは、ISOM/ODS'99においてカバー層厚み0.12mm、レンズNA0.70の概念を報告した¹²⁾。レンズ作成の容易さの観点から単一レンズで高NAを検討している。波長: 402nm, NA: 0.70, 焦点距離: 2.857mm, 作動距離: 0.75mmである。17GB容量のROMの実験を行い、20GBが可能とみている。

2.3 近接場光記録

図4は光ディスクの概念その3を示す。近接場光記録の2方式を示す。SIL(solid immersion lens)の発明以来、これまでの透明基板を介在させた光ディスクに代わり、first surface recording(表面光記録)の概念が出現した。微小開口あるいは超高NAレンズを用いた近接場光記録ではエバネセント波を記録層と結合させるため、レンズ端面から記録層距離を100nm以下の微小距離に保つ必要がある。このため、米国のTeraStor社では磁気記録技術で用いられているスライダにレンズを搭載し、スライダの浮上距離を一定に保つ方式を開発してきた(<http://www.terasto.com>)。スライダによる同様な光記録はNTTの浮田らが10年前に開発を行っている¹³⁾。しかし、表面光記録の概念は当時、実用化できなかった。NTTでは最近、スライダに微小開口を作成し、浮上距離83.5nm(線速度3m/s)での近接場光記録を報告している¹⁴⁾。TeraStor社の取り組みは、10~20GBの記録容量でインターネットのサーバー用などの大容量記録装置を応用分野としたと考えられるが、HDD(hard disk drive)の技術進歩と低価格化の勢いに押され、実用化が困難視されている。より超高密度をターゲットとしたものに変更せざるをえないであろう。

スライダ技術を必要としない近接場光記録が融合研の富永らにより考案された¹⁵⁾。スーパーレンズ(S-RENS: super resolution near-field system)である。非線形材料に作成される実質的な微小開口と記録層の距離は40nmと短く、固定されているのが特徴である。本特集に詳細が述べられている¹⁾。

2.4 光・磁気融合技術

ハイブリッド(光・磁気記録融合技術)が注目されてい

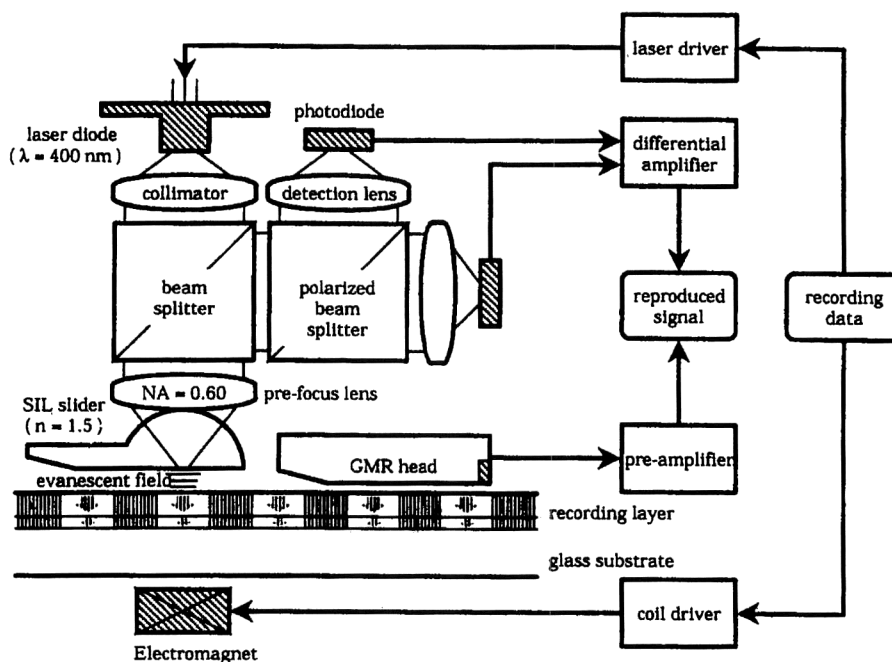


図5 光・磁気ハイブリッド記録・再生方式。

る。光磁気記録材料はアモルファス材料・垂直磁気ドメイン・保持力が高いなど磁気記録材料よりすぐれた機能をもっている。一方、磁気記録技術であるスライダ技術は近接場光記録・フォーカシング制御に有効である。また、高感度磁気信号検出が可能なGMR (giant magnetic resistive) ヘッドは魅力的なデバイスである。これらの観点から、日立のグループでは光磁気記録媒体の特性改良を行い、ハイブリッド記録再生方式を開発している¹⁶⁾。図5にODS 2000での発表を示す。スライダ浮上距離は80 nm、光強度変調方式での実験で35 Gbit/inch²が得られている。将来的には屈折率2.0のSILと、レーザーパルス磁界変調記録方式を採用することで、100 Gbit/inch²が可能と述べている。

3. 光ピックアップ関連の話題

3.1 次世代DVDの透明基板厚さはどうなるか

すでに光ディスクの概念で述べたように、透明基板厚さ、カバー層厚みが標準化されれば、レンズ設計に弾みがつくであろう。大量に安価なレンズを供給する体制が必要である。2エレメントレンズの耐久性・振動などの影響はどうか、大量生産できるか。早急な検討が望まれる。

3.2 SIL

高屈折率材料とその設計・製作方法はどうか。超半球レンズでは製作・使用マージンが少ないことがシミュレーションで明らかになっている。半球SILではレンズの適切な大きさの設計指針が示されている¹⁷⁾。

今後、高速データ転送のため、複数ヘッドの開発が必須になると思われるが、そのためには開口の小さな、したがって軽量のレンズが望ましいことは自明である。この観点からは、屈折率分布レンズを見直すべきであると考えられる¹⁸⁾。

3.3 ノイズの抑制と収差補償

光ディスクの高密度化にともない、光学部品の波面収差を少なくすることがより厳しく要請される。高品質スタンパー製作では表面をスムーズにすること¹⁹⁾や、基板ノイズの抑制には紫外線照射²⁰⁾が有効であることが報告されている。こうした考え方がレンズの生産に適用できるのではないか。

基板チルトによる収差補償が液晶パネルにより行われている^{21,22)}。CD-DVD互換レンズのための開口制御²³⁾、あるいはクロストークキャンセラーなどにも液晶パネルが検討されている。微小空間のパターニング制御を狙った液晶デバイスの開発も行われている²⁴⁾ので、これらの技術が高度な機能をもった光ピックアップの開発に適用されることを望みたい。

3.4 青紫・紫外線光源

次世代光ディスクの光源はGa_{0.49}N LD (gallium nitride laser diode)²⁵⁾ (波長405 nm)の採用が必然視されている。日亜化学に加えて複数企業から供給されることが望まれる。Ga_{0.49}N LDの光学的特性は満足できるものと評価されつつあるが、いまだ開発途上であり、今後とも各種特性の評価が必要である。光ディスク用の半導体レーザーは、

空間的にコヒーレントで、時間的にはインコヒーレントであることが望ましい²⁶⁾。GaAs系のLDについては自己パルセーションの設計指針も明らかになっている²⁷⁾が、GaN LDではどうであろうか。高周波重畳技術の検討¹¹⁾も必要である。

紫外線光源はポリカーボネート基板の光透過率が波長400 nm以下では急激に低下することから、開発がなおざりになっている。現状はマスタリングや光計測用に活用される²⁸⁾のみである。GaN LD以外でも紫外線光源の可能性が大きくなっている^{29,30)}ので、これらの活用を将来課題として検討すべきであると思われる。

4. 将来技術

4.1 100 Gbit/inch² を目指す技術

通産省では1998年度から5か年計画で産業技術応用研究開発プロジェクトとして「ナノメータ制御光ディスクシステム」を実施している。これは現状技術の限界を大幅に上回る記録密度100 Gbit/inch²以上、転送速度100 Mbps以上、アクセスタイム10 ms以下の光メモリーを実用化することを目的としている。このプロジェクトは、回折限界以上の記録密度の実現を目指したもので、米国で実施されたホログラフィーメモリーのプロジェクト (PRISM: Pockels effect read information storage material) に触発されて起案されたものである。テーマの概要は実施母体である光産業技術振興協会のホームページに示されている³¹⁾ので、ここではROMに限って少し紹介する。

最終年度にはトラックピッチ140 nm、16値変調の達成を、平成12年度にはそれぞれ200 nm、8値変調で40 Gbit/inch²の達成を中間目標としている。多値記録方式としてはSCIPER/RPR (single carrier independent pit edge recording/radial partial response)、PRML (partial response maximum likelihood)、ピットサイズ変調方式が検討されている。

ROMに関する最近の話題としては、TDKの菊川らによる超解像機能を有する反射膜 (Si, Ge, W, Moなどの利用により2~4倍の高密度化再生が可能)³²⁾、SONYの小林らが開発したGBR (groove baseband recording) という新しい方式³³⁾が注目される。

4.2 多値記録

カリメトリクス社では過去に、深さ変調の多値記録を提案していたが、ODS 2000では相変化媒体を用いたピット幅変調の多値記録を報告した³⁴⁾。CD-RWでは2 GB/層、DVD-RWでは10 GB/層、データ転送速度46 Mbpsと完成度が高い。効率的な多値コーディング技術 (ルックアッ

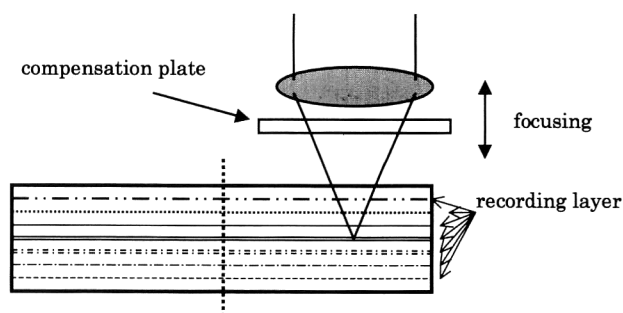


図6 3D多層光ディスクの概念。

プテーブルを用いた書き込み戦略：32 kB ブロック) が注目される。

4.3 多層記録

図6は3D多層光ディスクの概念を示す。共焦点顕微鏡の光学系により、各層からのクロストークの少ない信号再生が可能である。各種の記録材料を対象に開発が行われている。大阪大の河田らのグループはフォトリフラクティブ結晶 (LiNbO₃) を用い、2-フォトン吸収記録で層間隔40 μmの研究を行っている³⁵⁾。

ODS 2000のポスターにConstellation-3D社の発表が予定された³⁶⁾ (実際はキャンセルされた)。ホームページには技術の詳細が載せられている。多層記録に蛍光材料を用いて、層間のクロストークがない再生が可能と述べているが、技術の信憑性は不明である。

グループのない3D記録では、プッシュプル方式などのトラッキング信号が得られない。このための技術が提案された。

スタンフォード大学を背景とするSiross社のHesselinkは3D記録材料にサーボ情報を埋め込む技術を報告した³⁷⁾。フォトポリマー材料にホログラフィー技術で露光しフォーカス信号とトラッキング信号を書き込む。波長658 nm、レンズNA 0.6のシステムで層当たり記録容量4.5 GB、層間距離10~15 μm、9層の光ディスクを開発している。

UCSD (University of California, San Diego) を背景とするCall/Recall社でも、3D記録媒体のサーボ信号の検討をしている³⁸⁾。

図6に示すように、3D多層記録システムでは各層の記録再生時にレンズを移動させる必要がある。このときに発生する収差補償が必要となる。ダイナミックな位相制御デバイスの開発が望まれる。

4.4 ホログラフィー

筆者はホログラフィーには強い思い入れがある。連想メモリーなど人間の脳の記憶に近いものがいつかは実現する

と期待したい。当面は高速データ転送速度に特徴をもつシステムとして実用化してもらいたいと願っている。ODS 2000では世界最高のデータ転送速度6 Gbpsの報告がHesselinkによりポストデッドライン・ポスターペーパーとして報告された³⁹⁾。フォトポリマーディスク, IBM FLC SLM (International Business Machine ferroelectric liquid crystal spatial light modulator), Kodak C7 camera (1024×1024 pixel, 12.8 μm角), Nd:YAG (波長532 nm)を用いている。記録密度は5 bits/μm²であるが, 材料の光散乱・収縮などの改良で10倍の増大が期待できるといふ。

Lucent社からはフォトポリマー, CMOS光検出器アレイの開発などが報告された⁴⁰⁾。直径130 mmディスク, 青色光源(松下製: 415 nm, 830 nm LDの高調波)を用いて400 GBの記録容量が達成可能といふ。

NTTの今井はホログラフイーメモリーの課題として, システムイメージの標準化の重要性を主張している⁴¹⁾。筆者は出席できなかったが, 2000年6月6日~7日の間, ハワイにおいてOIDAの主催によりワークショップ“High Throughput Optical Storage”が開催された⁴²⁾。SLMとしてシチズン時計から4千万画素の液晶デバイス(データレート3 Gbps)が開発されているので, これに見合うようなシステムの開発を検討しようという試みと思われる。

なぜ日本ではこのようにシステムイメージ優先で, 業界コンセンサスの構築を企画することがなされないのか, 悲しい現実である。

DVD-RAMとDVD-RWの競争が始まった。DVRはこれからの業界のコンセンサス作りが重要となる。レンズの安価な大量供給のために, 光学分野の技術者・研究者に発言を期待したい。ODS 2000の主な発表を紹介した, 多層・多値・多波長・近接場・ホログラフイーなど, 多くの可能性を秘めた光メモリーの発展を期待したい。

文 献

- 1) 特集「極限に挑む光記録」, 光学, **29** (2000) 664-695.
- 2) 三橋慶喜: “超高密度記録光ディスク技術の動向”, 電子情報通信学会誌, **83** (2000) 353-361.
- 3) Advanced Optical Storage Technologies, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **4** (1998) 813-885.
- 4) ソニー, パイオニア方式採用, 2極化へ。日刊工業新聞, 2000年5月9日。
- 5) 互換性確保で新計画。日刊工業新聞, 2000年6月28日。[http://www.dvdforum.com/]
- 6) T. Ohta, K. Inoue, T. Ishida, Y. Gotoh and I. Satoh: “Thin injection-molded substrate for high density recording phase-change rewritable optical disk,” Jpn. J. Appl. Phys.,

- 32** (1993) 5214-5218.
- 7) International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: Japanese National Body for ISO/IEC JTC1, Proposal of New Work Item: 90 mm overwritable optical disk cartridges using phase change. ISO/IEC JTC1/SC23 N725 (1995. 1. 5), ISO/IEC 14760 (1997). [http://www.itsecj.ipj.or.jp/sc23/]
- 8) D. Ro, D. S. Yoon, K. G. Lee, I. O. Hwang, C. M. Park, Y. G. Kim, I. S. Park, D. S. Kim, H. K. Choi and D. H. Shin: “Experiment on 0.4 mm molded substrate for 54 GB high density optical disc,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, PD2* (Whistler, Canada, 2000).
- 9) K. C. Park, H. N. Kim, S. Y. Jeong, S. K. Ahn, T. S. Lee, S. W. Lee, D. C. Lee and J. Y. Kim: “High density optical disc readout using a blue violet laser diode,” *Joint ISOM/ODS '99 Technical Digest TuD27* (Koloa, Hawaii, 1999) pp. 12-15. *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, MB4 & PD7* (Whistler, Canada, 2000).
- 10) K. Yamamoto, K. Osato, I. Ichimura, F. Maeda and T. Watanabe: “0.8-numerical-aperture two-element objective lens for the optical disk,” Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 456-459.
- 11) K. Osato, I. Ichimura, F. Maeda, K. Yamamoto and Y. Kasami: “Progress in optical disk recording with over 20 Gb of capacity,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, MB1* (Whistler, Canada, 2000) pp. 15-17.
- 12) M. Itonaga, S. Chaen, E. Nakano, H. Nakamura, F. Ito, K. Iwata, T. Kondo, E. Nakagawa, T. Kojima, A. Nishizawa and K. Miyazaki: “Optical disk system using a high-numerical aperture single objective lens and a blue LD,” Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 978-979.
- 13) H. Ukita, N. Nakada and T. Abe: “Improvement in lasing properties of an integrated flying optical head with a diamond-film-coated slider,” Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 524-528.
- 14) H. Yoshikawa, Y. Andoh, M. Yamamoto, K. Fukuzawa, T. Tamamura and T. Ohkubo: “7.5-MHz data-transfer rate with a planar aperture mounted upon a near-field optical slider,” *Opt. Lett.*, **25** (2000) 67-69.
- 15) J. Tominaga, H. Fuji, A. Sato, T. Nakano and N. Atoda: “The characteristics and the potential of super resolution near-field structure,” Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 957-961.
- 16) K. Ito, H. Saga, H. Nemoto and H. Sueda: “Advanced recording method using near-field Optics and the GMR head,” *Technical Digest, Optical Data Storage 2000 Conference Digest, MC1* (Whistler, Canada, 2000) pp. 30-32.
- 17) H. Ooki: “SIL optics and related topics,” *Tutorial Seminar TEXT BOOK, ISOM '98* (1998).
- 18) 橘高重雄: “ロッドレンズとSILによる近接場光記録用対物レンズ”, 第47回応用物理学関係連合講演会予稿集 (2000) 28p-R-8.
- 19) S. Morita, M. Nishiyama, H. Konishi, M. Hayashi, T. Akiyama and T. Niwa: “High quality optical disc stampers with round edge grooves,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, MA3* (Whistler, Canada, 2000) pp. 9-11.
- 20) K. Kawase, Y. Muto, K. Yamaguchi, N. Ando, Y. Maeda, M. Yamada and M. Kaneko: “10 Gbit/inch² MO-disk using blue laser,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, WB3* (Whistler, Canada, 2000) pp. 173-175.
- 21) S. Ohtaki, N. Murao, M. Ogasawara and M. Iwasaki: “The

- applications of a liquid crystal panel for the 15 Gbyte optical disk systems,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1744-1749.
- 22) S. Stallinga, B. H. Hendrick, P. van de Witte: “Liquid crystal aberration compensation devices,” *Technical Digest, Photonics Taiwan 26-16. 20* (Taipei, Taiwan, 2000).
- 23) Y. Tsuchiya, S. Kajiyama, Y. Kano, Y. Matsumura and S. Ichiura: “Digital video disc/compact disc compatible pick-up with liquid crystal shutter,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 481-485.
- 24) J. H. Kim, J. Yamamoto and H. Yokoyama: “Controlling surface alignment on nanoscopically tailored competing domains,” *Technical Digest, The 18th Int. Liquid Crystal Conf. 24D-64-P* (Sendai, Japan, 2000) p. 18.
- 25) S. Nakamura: “Current status and prospects of InGaN-based laser diodes,” *JSAP Intern.*, **1** (2000) 5-17.
- 26) 三橋慶喜, 島田潤一, 木暮 茂: 特許第 2543674 号 (1996).
- 27) M. Yamada: “Computer simulation of feedback induced noise in semiconductor lasers operating with self-sustained pulsation,” *IEICE Trans. Electron.*, **E81-C** (1998) 768-780.
- 28) M. Takeda, M. Furuki, H. Yamatsu, T. Kashiwagi, Y. Aki, A. Suzuki, K. Kondo, M. Oka and S. Kubota: “Deep UV mastering using an all-solid-state 266 nm laser for an over 20 Gbytes/layer capacity disk,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 1837-1838.
- 29) ダイヤモンドでのエキシトン発光の非線形効果を発見 (発光波長 235 nm). 電総研ニュース 605 号 (2000 年 6 月). [<http://www.etl.go.jp/jp/gen-info/news/etl-news/index.html>]
- 30) 半導体グレードの ZnO 単結晶薄膜の作製に成功. 電総研ニュース 601 号 (2000 年 2 月). [<http://www.etl.go.jp/jp/gen-info/news/etl-news/index.html>]
- 31) 次世代光メモリ推進機構 ナノメータ制御光ディスクシステム. [<http://www.oida.or.jp/index-j.html>]
- 32) 菊川 隆, 加藤達也, 新開 浩, 宇都宮肇: “超解像機能を有する反射膜を利用した高密度 ROM ディスク”, 第 47 回応用物理学関係連合講演会予稿集 (2000) 28p-R-2. および光産業技術振興協会平成 12 年度第 1 回光ディスク懇談会.
- 33) S. Kobayashi, T. Horigome, H. Yamatsu, S. Masuhara and K. Saito: “GBR (Groove Baseband Recording) for an optical disc ROM,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, MA4* (Whistler, Canada, 2000) pp. 12-14.
- 34) M. P. O’Neil and T. L. Wong: “Multi-level data storage using phase-change optical disc,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, WB2* (Whistler, Canada, 2000) pp. 170-172. [<http://www.calimetrics.com/>]
- 35) S. Kawata: “Photorefractive optics in three-dimensional digital memory,” *Proc. IEEE*, **87** (1998) 2009-2020.
- 36) I. Sander: “Introduction to FMD technology,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, P22* (Whistler, Canada, 2000). [<http://www.c-3d.net>]
- 37) L. Hesselink: “Three dimensional recording (3DR) technology,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, WA1* (Whistler, Canada, 2000) pp. 149-151. [<http://www.sirostech.com>]
- 38) H. Zhang, F. B. McCormick, A. S. Dvornikov, C. Champan, E. P. Walker and N. H. Kim: “Single-beam two-photon-recorded monolithic multi-layer optical disks,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, WA2* (Whistler, Canada, 2000) pp. 152-154. [<http://www.call-recall.com>]
- 39) S. Orlov, E. Bjornson, W. Philips, L. Hesselink, R. Okas and R. Snyder: “6 Gbit/sec transfer rate demonstration in a holographic disk data storage system,” *Optical Data Storage 2000 Conference Digest, P31* (Whistler, Canada, 2000).
- 40) L. Dhar, A. Hale, K. Curtis, M. Schnoes, M. Tackitt, W. Wilson, A. Hill, M. Schilling, H. Katz and A. Olsen: “Photopolymer recording media for high density holographic data storage,” *Opt. Lett.*, **24** (1999) 487.
- 41) 今井欽之: “フォトリフラクティブ単結晶の育成とメモリー応用,” *応用物理*, **69** (2000) 525-531.
- 42) OIDA Workshop on High Throughput Optical Storage, June 6-7, 2000, Honolulu. [<http://www.oida.org/>]

(2000 年 7 月 24 日受理)