

Blu-ray Disc システムベースによるビット記録用 追記型多層記録メディアの開発動向

菊川 隆・井上 素宏・小須田敦子・丑田 智樹

Development of Write-Once Multi-Layer Recording Media for Bit Recording Based on Blu-ray Disc System

Takashi KIKUKAWA, Motohiro INOUE, Atsuko KOSUDA and Tomoki USHIDA

A review on the recent development status of write-once multi-layer recording media for bit recording based on Blu-ray Disc (BD) optics is given in the paper. The most important point for the development of write-once multi-layer recording media is the optical design of the recording materials and recording layers. By controlling the optical constants of recording materials and the optical parameters of recording layers, sufficient signal quality was obtained under the condition of 32 GB/layer recording on both 10-layer multi-layer recording media and 16-layer multi-layer recording media at the recording speed of 36 Mbps that corresponds to 1x speed of BD specification. Additionally, a new design concept of the optical parameters of recording layers that leads media structure to much simpler are also given in the paper.

Key words: multi-layer recording media, recording material, recording layer, optical constant, optical parameter

光メディアの容量増大は、きたるべき情報爆発時代の到来と地球温暖化に代表される環境問題の観点から、緊急かつ重要な要求である。なぜならば、光記録システムはデータのアーカイブにおいてエネルギーの消費をしない本質的にエコロジカルなストレージであり、したがって、将来のデータ保存においてエネルギー消費のきわめて少ないデータのアーカイブシステムを提供できる可能性があるからである。そこで、現在においては、Blu-ray Disc (BD) 以降の次世代の光記録技術を評価するポイントとして、大容量が実現でき、かつ時期的に最も早く実現可能な光記録技術は何か、ということが最も重要なポイントとして挙げられる。

今後の光記録技術において大容量化を実現する手段として、光の透過性および焦点位置の選択性を生かして、メディアの厚み方向、すなわちメディアの体積を利用する方法が最も有効であると考えられる。メディアの体積を利用する技術としては、ホログラフィックメモリー技術¹⁻³⁾、

マイクロホログラム技術⁴⁻⁶⁾、二光子吸収技術^{7,8)}、記録層多層化技術⁹⁻¹¹⁾が挙げられる。これらの技術を時期的な実現可能性の観点から考えると、記録層多層化技術には、他の技術に対するシステム的なアドバンテージが存在する。記録層多層化技術では既存のBDの技術的資産が利用できる、つまり特別な光源、光学系、変調方式、信号処理が不要だからである。また、記録層多層化技術では、事前にメディアの中に記録層の物理的な位置が決められており、フォーカスサーボやトラックサーボといったサーボの観点においても、他の技術に対して明らかに優位である。そこで問題となってくるのは、そのような記録層の多層化に用いることができる記録材料ないしは記録層を実現できるか、ということである。

本論文では、上記の問題に即して、記録層多層化技術において本質的に重要な意味をもつ記録材料および記録層について詳述していく。さらに、記録容量だけにとどまらず、その先の時期的な実現可能性を見越して、リーズナブル

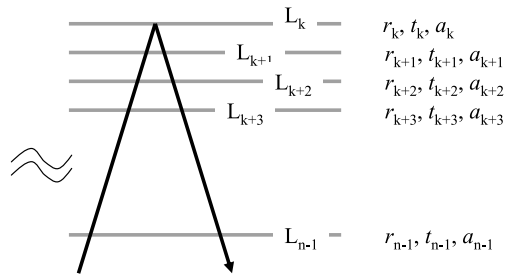


図1 多層メディアに光が入射している模式図。

表1 10層メディアサンプルの各層自体の反射率 r , 透過率 t , 吸収率 a .

層	r	t	a
L ₀	15.8%	0%	34.4%
L ₁	7.4%	68.1%	23.7%
L ₂	4.5%	76.8%	18.3%
L ₃	3.2%	81.5%	15.0%
L ₄	2.5%	93.0%	4.2%
L ₅	2.2%	93.4%	4.2%
L ₆	1.8%	93.8%	4.2%
L ₇	1.8%	93.8%	4.2%
L ₈	1.5%	94.1%	4.2%
L ₉	1.5%	94.1%	4.2%

ルにメディアのコストダウンにつながり信号特性も向上するような、記録層の光学特性の新しい設計指針についても言及する。

1. 光学設計指針

本章では、記録層多層化技術における記録層の基本的な設計指針について述べる。図1に多層メディアに光が入射している模式図を示す。ここで、小文字で示される r, t, a はおのおの各記録層の記録層自体の（単層状態での）反射率、透過率、吸収率といった光学特性を示す。Lは「層」を意味し、また、下付きの添え字は記録層の番号で、BDの規格に準じて、光入射側から遠い層ほど数値を小さくしている（最も奥側は0）。全部で n 層の記録層をもつ多層メディアにおいて、奥側から $k+1$ 番目の L_k 層の積層状態での反射率 R_k （大文字の R は積層状態での反射率を示す）は次の式で与えられる。

$$R_k = (t_{k+1} * t_{k+2} * \dots * t_{n-1})^2 * r_k \quad (1)$$

すなわち、ある層の積層状態の反射率は、その層の光入射側に対して手前側にある記録層自体の透過率の積の2乗と、その層自体の反射率の積で表されることになる。また、 $0 \leq t \leq 1$ であることから、奥の層ほど（ k が小さいほど）、また層数が多いほど（ n が大きいほど）、記録層の反射率が低くなるのがわかる。光記録システムでは反射率を信号の強度としているため、記録層の反射率は高いほどSN比がよくなる。したがって、 R の値は大きいほど望ましい。このことを記録層多層化技術で実現するためには、式(1)より手前側の記録層自体の透過率を高くすることが必要である。つまり、記録層多層化技術における最も基本的な光学設計指針とは、記録層自体の透過率 t をできるだけ高くすることである。また、 L_k 層の積層状態での吸収率 A_k は

$$A_k = (t_{k+1} * t_{k+2} * \dots * t_{n-1}) * a_k \quad (2)$$

で示される。すなわち、ある層の積層状態での吸収率は、その層の光入射側に対して手前側にある記録層自体の透過率の積と、その層自体の吸収率の積で表されることにな

る。記録型のメディアでは A が大きいほど記録感度が高くなる（記録パワーが少なくてすむ）ので、 A の値は大きいほど望ましい。したがって、反射率と同様に手前側の記録層自体の透過率を高くすることが必要である。一方で、透過率を単純に高くすることにより、問題が生じる。原理的に反射率、透過率、吸収率との間には

$$r + t + a = 1 (= 100\%) \quad (3)$$

で示される関係が成立するため、透過率を過度に高くすると反射率や吸収率が低くなりすぎ、したがって式(1)、(2)からもわかるように、逆に積層状態での反射率や吸収率が低くなってしまふ。以上のことから、記録層多層化技術における記録層の光学設計指針は、システムがハンドルできるSN比やレーザーが射出できる記録パワー、層数などを勘案し、式(3)の制約のもとでいかに r, t, a を設計していくかがポイントになり、特に式(1)、(2)からわかるようにいかに透過率 t を高くするか、が重要になる。

2. 記録材料・記録層設計

われわれは以前から、記録層を構成する記録材料のうち、記録パワーレーザーの照射により物理・化学的反応を起こし内部に記録マークを担持する記録膜材料として、Bi-Ge-Oが高透過率と記録感度の両立が可能であると考え開発を進めてきた⁹⁻¹¹⁾。今回の10層ないしは16層メディアにおいても、記録膜材料としてBi-Ge-Oを採用している。記録層としては、このBi-Ge-OをTiO₂によって挟んだものを基本構成とし、16層メディアでは記録感度の減少を補償する記録補助膜として、この基本構成にFe₂O₃を付加したものを記録層の基本構成としている。このような基本構成のもとでは、参考文献⁹⁾にあるようにBi-Ge-OのGeの量と、光の多層膜による干渉を利用したTiO₂の膜厚の変化により、透過率をかなりの広範囲で制御することができる。表1、表2に、上記の方法によって、おのおの10、16層メディアの各記録層自体の反射率 r , 透過率 t , 吸収

表2 16層メディアサンプルの各層自体の反射率 r 、透過率 t 、吸収率 a .

層	r	t	a
L ₀	8.5%	80.5%	10.9%
L ₁	6.3%	84.9%	8.8%
L ₂	4.1%	87.2%	8.8%
L ₃	2.8%	89.0%	8.2%
L ₄	2.3%	90.5%	7.1%
L ₅	2.1%	91.5%	6.4%
L ₆	1.7%	92.5%	5.8%
L ₇	1.3%	93.3%	5.4%
L ₈	1.3%	93.9%	4.8%
L ₉	1.2%	94.3%	4.5%
L ₁₀	1.1%	94.8%	4.1%
L ₁₁	1.0%	95.0%	4.0%
L ₁₂	0.9%	95.4%	3.7%
L ₁₃	0.8%	95.7%	3.4%
L ₁₄	0.8%	96.0%	3.2%
L ₁₅	0.7%	96.3%	3.0%

率 a を制御した結果を示す。この制御では、積層した状態での反射率 R_k がどの層でもおおよそ同じ値となるようにしており、具体的には、10層メディアでは $R_k=1.5\%$ 、16層メディアでは $R_k=0.7\%$ となるようにすることができた。ただし、10層メディアのL₀では、透過率がゼロとなるような全反射型記録層を採用している。

3. 多層メディア化

上記までは、基本的には記録層自体、すなわち単層の状態での結果である。媒体化に際しては、これらを積層して多層化していかななくてはならない。多層メディア化の手順としては以下の通りである。基板として、1.1 mm厚の射出成形されたグループ付きポリカーボネート基板を用いた。その上に、スパッタリング法によってL₀記録層を形成した。次に、L₀記録層とL₁記録層とを隔てる中間層S₁層を、UV硬化樹脂をスピコート法によって形成した。中間層の形成の際は、未硬化状態の樹脂にグループが形成されたスタンパーを押しあて、紫外線を照射し中間層樹脂を硬化させることにより、中間層にグループを転写した。この記録層Lと中間層Sの積層を所定の記録層数(10もしくは16)となるまで繰り返し、最後にカバー層作製のためのUV硬化樹脂をスピコート法にて形成し、紫外線を照射し樹脂を硬化させることによりカバー層として、ディスクを完成させた。記録層Lの形成では、前2章に記したように、所定の光学特性となるようにBi-Ge-Oの組成や各記録膜の膜厚を制御している。

使用している評価機の球面収差補正範囲、つまり使用している評価機で測定できる範囲がメディアの最表面から40~120 μmの間と限られているため、10層のメディアに

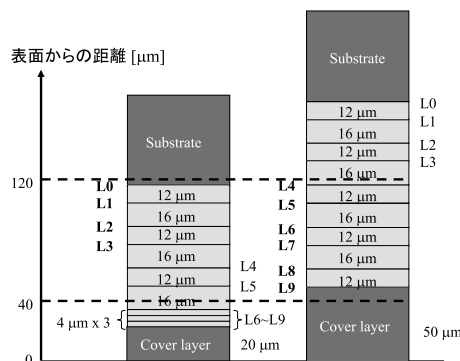


図2 10層メディアサンプルの模式図。

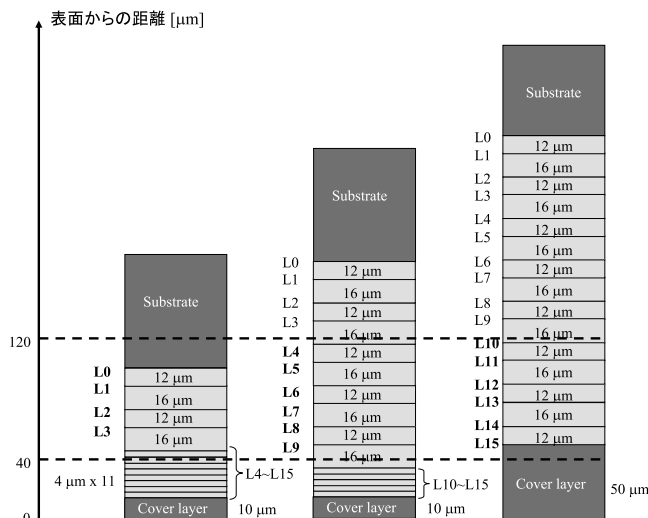


図3 16層メディアサンプルの模式図。

関しては2種類のサンプルを、16層のメディアについては3種類のメディアを作製した。サンプルの模式図については図2、図3を参照されたい。一般的に、多層メディアにおいては、後述する共焦点クロストークを避けるためにおのおの中間層の膜厚は異なることが原則となるが、本検討ではメディアサンプルの簡便化のため、中間層の膜厚としては2種類の膜厚としてある。2種類の中間層膜厚で共焦点クロストークの影響を減らす方法については、別章にて詳述する。

4. 記録再生結果

上記のようにして作製した10層、16層メディアサンプルをBD評価機によって測定した。評価機で使用しているレーザーの波長は406 nm、対物レンズの開口数は0.85であり、BDのスペックに準拠している。記録信号の変調方式は(1,7) RLLで、記録密度は32 GB/layer相当、記録再生の線速は3.84 m/sである。この記録密度と線速での記録再生は、BD 1xの記録スピードである36 Mbpsに相当す

表3 10層メディアサンプルのシンボルエラーレートと記録パワー.

	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉
シンボルエラーレート	3.7×10^{-4}	1.2×10^{-4}	1.5×10^{-4}	2.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	8.4×10^{-5}	7.7×10^{-5}	3.6×10^{-4}	1.5×10^{-5}	3.8×10^{-4}
記録パワー [mW]	18	13.75	14	15.5	27.5	26	21.5	20.5	18.5	17.3

表4 16層メディアサンプルのシンボルエラーレートと i-MLSE と記録パワー.

	L ₀	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇
シンボルエラーレート	2.0×10^{-4}	8.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	9.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}
i-MLSE [%]	12.3	11.3	10.9	11.0	10.4	12.0	11.6	11.1
記録パワー [mW]	18	13.75	14	15.5	27.5	26	21.5	20.5
	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁	L ₁₂	L ₁₃	L ₁₄	L ₁₅
シンボルエラーレート	4.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-5}
i-MLSE [%]	11.3	11.3	10.4	10.9	11.8	11.1	11.7	10.7
記録パワー [mW]	18	13.75	14	15.5	27.5	26	21.5	20.5

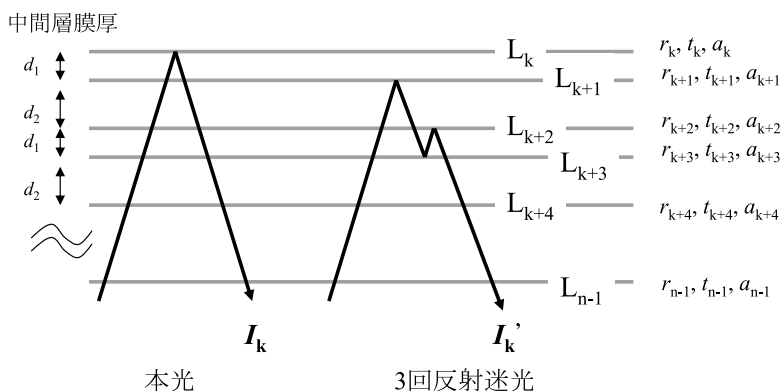


図4 中間層の膜厚が d_1, d_2 と2種類の媒体構成における本光の光路と3回反射迷光の光路の模式図.

る. 記録は $0.32 \mu\text{m}$ トラックピッチのトラックに3本記録を行い, 中央のトラックを再生している. 信号処理は PR classが12221であるようなPRMLを用いており, 信号品質の指標である i-MLSE あるいはシンボルエラーレート (SER) にて信号品質を評価した. これらの条件は, すべて BD の規格に準拠した条件である.

表3および表4に, 10層, 16層メディアサンプルの各層に 32 GB/layer で記録したときのシンボルエラーレート (SER) と記録パワー, および i-MLSE の値 (表4のみ) を示す. SERは 4×10^{-4} が, i-MLSEは 12%をクライテリアとすると, どちらのメディアサンプルのどの層もほぼこれらをクリアしていることがわかる. また, 記録パワーも 30 mW 以下であり, 実用上問題のない記録感度が得られている. すなわち, 層によっては 90%以上というきわめて高い透過率を有しながらも, 実用のレーザーパワーで記録ができるという記録膜材料および記録層を現実化し, 10層 \times 32 GB/layer = 320 GB, 16層 \times 32 GB/layer = 512 GB という大容量の技術的実現性を, ほぼすべて BD の規格に準拠した条件での BD の 1 倍速記録再生という高い実用性

レベルで実証することができた.

5. 記録層とメディア構成の簡略化

前章では, 積層状態での反射率がおおむね同一となるように, 各記録層の光学特性を制御した. その結果, 10層メディアサンプルでは8種類の, 16層メディアサンプルでは16種類の記録層が必要となった. また, 中間層の膜厚が2種類であるため, 共焦点クロストークの影響が大きい状態での測定となった. ここで, 共焦点クロストークについて詳細を述べる.

図4には, 中間層の膜厚が d_1, d_2 と2種類の媒体構成において, 本来再生したい最も奥の層を再生する本光の光路と, 3回反射の迷光の光路を模式的に示している. このケースでは, 中間層の膜厚が d_1, d_2 と2種類であるため, 本光の光路長と迷光の光路長が一致してしまい, したがって検出フォトディテクター上では, 本光と迷光とが全く同じサイズで入射してしまうことになり, いかなるデバイスによっても迷光を除去することが不可能になってしまう. このように, 本光の光路長と同じ光路長をもつ迷光による

層間クロストークのことを、共焦点クロストークとよぶ。3回反射迷光による共焦点クロストークは、図4からわかるように、任意の2つの中間層膜厚の和が、他の任意の2つの中間層膜厚の和に等しくなると発生し、このようなケースは、たとえおのおのの中間層の膜厚をすべて異なる膜厚としても、層数が増えるほど発生する確率は急激に高くなる。そこでわれわれは、ある程度の層数以上での共焦点クロストークの発生は不可避と考え、共焦点クロストークの発生を前提に、最もシンプルな媒体構成(中間層膜厚)を採用し、その代わりに記録層の光学設計により共焦点クロストークの影響を少なくするための手段を考案した。

図4により、本光の強度と3回反射迷光による共焦点クロストークの強度比を考える。本光の強度 I_k は第1章の式(1)と同様の式にて与えられる。一方、図4の3回反射迷光による共焦点クロストークの強度 I'_k は、透過する層と反射する層(3層存在する)を考慮すると、

$$I'_k = (t_{k+2} * t_{k+3} * \dots * t_{n+1})^2 * r_{k+1} * r_{k+2} * r_{k+3} \quad (4)$$

で与えられる。したがって式(1)と式(4)から、本光の強度に対する3回反射迷光による共焦点クロストークの強度比 I'_k/I_k は

$$I'_k/I_k = (r_{k+1} * r_{k+2} * r_{k+3}) / (r_k * t_{k+1}^2) \quad (5)$$

となる。式(5)によると、本光の強度に対する3回反射迷光による共焦点クロストークの強度比は、光入射方向に対して1つ手前の層の透過率の2乗に反比例し、光入射方向に対して3つ手前の層の反射率の積に比例する。したがって、他の層に対して「手前の層」になり得ない L_0 層を除くすべての層の反射率はできるだけ低く、透過率はできるだけ高くすることが、本光の強度に対する3回反射迷光による共焦点クロストークの強度比の減少に対して有効である。しかしながら、過度に記録層の反射率を低く、透過率を高くすると、手前の層で光が減衰されてから届く奥側の記録層では、積層状態で極端に反射率が低くなってしまい信号のSN比が確保できなくなる上に、記録も困難になってしまう。したがって、手前側の記録層はできうる限り透過率を高くし、奥側の記録層では透過率と反射率とのバランスをとった記録層設計が、SN比の観点から現実的かつ、式(5)で示される本光の強度に対する3回反射迷光による共焦点クロストークの強度比を低くすることができる設計となる。

上記設計指針に従い、10層メディアサンプルを作製した。中間層の膜厚は交互に12, 16 μm としてある。このサンプルでの各記録層自体の反射率、透過率、吸収率の値を表5に示す。この表からわかるように、手前側の記録層の L_9 - L_4 はできうる限り透過率を高くした共通の記録層設計

表5 新設計10層メディアサンプルの各層自体の反射率 r 、透過率 t 、吸収率 a 。

層	r	t	a
L_0	1.5%	91.5%	7.0%
L_1	1.5%	91.5%	7.0%
L_2	1.5%	91.5%	7.0%
L_3	1.5%	91.5%	7.0%
L_4	0.7%	94.7%	4.6%
L_5	0.7%	94.7%	4.6%
L_6	0.7%	94.7%	4.6%
L_7	0.7%	94.7%	4.6%
L_8	0.7%	94.7%	4.6%
L_9	0.7%	94.7%	4.6%

表6 新設計10層メディアサンプルのジッター値。

層	ジッター[%]
L_0	7.6
L_1	6.8
L_2	6.2
L_3	5.8
L_4	7.9
L_5	7.5
L_6	7.4
L_7	7.2
L_8	6.7
L_9	6.6

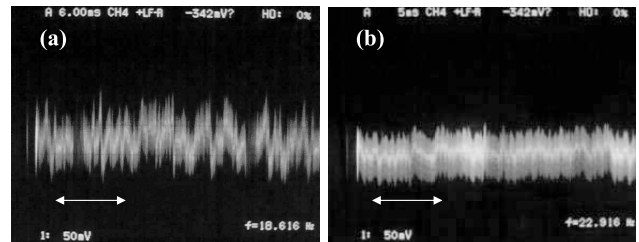


図5 (a) 従来光学設計による10層メディアサンプル L_0 層のエンベロープ、(b) 新規光学設計による10層メディアサンプル L_0 層のエンベロープ。

で、奥側の記録層の L_3 - L_0 は透過率と反射率とのバランスをとった記録層設計となっている。このメディアサンプルを25 GB/layerの記録密度で記録再生したときの記録パワーとジッター値を表6に示す。この表からわかるように、 L_4 と L_3 との間に記録層材料の違いによるギャップがみられるものの、記録パワー、ジッター値とも十分に実用のレベルである。図5に、4章で示した10層メディアサンプルの L_0 のエンベロープと本章での10層メディアサンプルの L_0 のエンベロープを比較して示す。表1と表5の数値を式(5)に代入すると、4章で示した10層メディアサンプルの L_0 での I'_k/I_k はおおよそ14.5%、本章での10層メディアサンプルでの I'_k/I_k はおおよそ2.7%と見積もられるが、図5にみられるエンベロープの乱れの程度の違いからみても、本章での設計指針の効果は明らかである。図5の

両矢印で示された範囲はジッター値を測定したサンプリングエリアとなるが、4章で示した10層メディアサンプルでは、この範囲よりも広くデータサンプリングをすると、エンベロープの乱れのためにデータ測定が不可能になるが、本章での10層メディアサンプルでは、サンプリングエリアの範囲を全周としても、ジッター値は表6のジッター値と全く変わらなかった。

以上から、本章で示した設計指針で作製したメディアサンプルは、4章で示した従来型のメディアに比べて、共焦点クロストークの影響が低減され、さらに記録層の種類も2種類に低減され、しかも中間層の膜厚も2種類に低減されるという信号特性の向上と、記録層材料およびメディア構造の簡略化を同時に実現したサンプルとなっていることがわかる。

6. 今後の展開

以上までの章で、記録層多層化技術を実現するためのメディアのフィジビリティと、さらに一步踏み込んでメディアの簡略化までを概説してきた。しかしながら、記録層多層化技術にはさらなる進展がある。2010年の9月に開催された International Symposium on Optical Memory 2010 (ISOM 2010) では、パイオニア(株)とTDK(株)が共同で、トラッキングサーボのためのグループを設けた専用層を1層だけ設けて、他の記録層にはグループを設けないという形態のメディアで、かつ、上記5章の設計指針に基づいたメディアにおいて、16層×32GB=512GBのフィジビリティが示された¹²⁾。このことは、中間層にグループを転写するプロセスを省略できることを示しており、さらなるメディア構造の簡略化によるメディアの製造コストの低減が期待できる。

このように、他の体積記録技術が基本的には原理検証レベルにとどまっているのに比べて、記録層多層化技術は実用条件での記録再生に成功しており、その技術的実現性の高さは明らかに他の技術をリードしている。さらに、検証された容量は12cm直径のメディアで512GBという、他の体積記録技術が原理的にも実験的にも検証できていない

ような大容量であり、しかもメディアのコストダウンに向けての技術検討まで進んでいる状態である。このことから、記録層多層化技術はBD以降の次世代の光記録技術として大本命として位置づけることができる技術であると考えられる。

文 献

- 1) S. S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan and R. Snyder: "High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 4902-4914.
- 2) K. Anderson and K. Curtis: "Polytopic multiplexing," *Opt Lett.*, **29** (2004) 1402-1404.
- 3) H. Horimai, X. Tan, J. Li and K. Suzuki: "Collinear holography," *Appl. Opt.*, **44** (2005) 2575-2579.
- 4) X. Shi, B. L. Lawrence, M. Dubois, E. P. Boden, C. Erben, K. L. Longley and M. C. Nielsen: "Thermoplastic media for holographic data storage," *Proc. SPIE*, **5939** (2005) 59390A.
- 5) K. Osawa, H. Mikami, T. Kurokawa and K. Watanabe: "Homodyne detection for readout signals of optical disc with a high-coherence laser," *Proc. SPIE*, **7730** (2010) 77300E1-77300E8.
- 6) K. Saito and S. Kobayashi: "Analysis of micro-reflector 3-D optical disc recording," *Proc. SPIE*, **6282** (2006) 6282131-6182136.
- 7) H. Yamatsu, Y. Takemoto, S. Tashiro, G. Fujita, T. Miura, T. Iwamura, H. Uchiyama and K. Yun: "Void type micro-reflector recording using an all-semiconductor picosecond laser," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM)* (2010) pp. 216-217.
- 8) T. Tanaka and S. Kawata: "Three-dimensional multilayered optical memory using two-photon induced reduction of Au³⁺ doped in PMMA," *IEEE Trans. Magn.*, **43** (2007) 828-831.
- 9) 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) 62820I1-62820I11.
- 10) T. Kikukawa, M. Inoue, K. Mishima and T. Ushida: "Recording characteristics of 10-layer recordable optical disc and a prospect for over 500 Gbyte recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (2010) 08KF01-08KF02.
- 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) 77300D1-77300D6.
- 12) M. Ogasawara, K. Takahashi, M. Nakano, M. Inoue, A. Kosuda and T. Kikukawa: "16 layers write once disc with a separated guide layer," *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory (ISOM)* (2010) pp. 224-225.

(2011年5月26日受理)