

DVD-RW version 1.0 の要素技術

The technologies of DVD-RW version 1.0

加藤 正浩, 山口 淳, 村松 英治, 谷口 昭史

Masahiro Kato, Atsushi Yamaguchi, Eiji Muramatsu, Shoji Taniguchi

要 旨 DVD-RWの開発と規格化の推進には,良好な記録再生特性を得るための技術開発が必要不可欠であった。記録パルスストラテジ, ディスクの最適基板形状, およびプリフォーマット信号再生技術など, 重要な開発項目がいくつか存在した。それらのDVD-RW開発における要素技術について, シミュレーション計算と実験結果を用いた報告を行う。

Summary In order to develop and establish the physical format of DVD-RW, there were essential technologies to develop, to get the best playback signal characteristics. Therefore, we examined these important items, the write pulse strategy, the optimization of disc substructure, the detection method of pre-formatting signal. This report presents these technologies in the development of the DVD-RW with the examination results of simulation and experiments.

キーワード : DVD-RW, 規格化, 記録再生特性, 記録パルスストラテジ, ディスク最適基板形状, ランドプリビット

1. まえがき

1999年12月, DVDレコーダー(DVR-1000)がパイオニアから発売され, DVDフォーマットによる映像記録機が初めて民生市場に導入された。テープに比べディスクの特長を生かした機能や利便性を持ち, 近い将来VCRに取って代わる商品として期待されている。

DVDレコーダーの記録メディアはDVD-RWディスクが採用されており, その物理規格はDVD-RW book version 1.0 part1(physical specifications)⁽¹⁾として1999年11月にDVDフォーラムから発行された。DVD-RWの特長のひとつは, 他のDVDメディアとの互換性を有することである⁽²⁾。DVD-RWは相変化材料を用い, DVD-Rに1000回程度の書換え機能を追加したものであるため, DVD-RWの物理フォーマットは基本的にDVD-Rと同じである⁽³⁾。したがって, 記録後のDVD-RWディスクは, 記録後

のDVD-Rと同様に, ROM型DVDとの再生互換性がきわめて高い。DVD-RWの物理特性は, 表1からわかるように1層のDVD-ROMとほぼ同等である。唯一, 異なるのが反射率であるが, その値は2層DVD-ROMディスクと同じであるように規定されている。すなわち, 再生専用ドライブでDVD-RWディスクを再生する際に, ディスク判別が必要となる可能性があるのみで, ハードウェアの変更は通常必要ではない。一方, 同じ書換え型であるDVD-RAMの場合は, 大幅なハードの変更を施さないとならないため, 再生専用ドライブでの互換を得るのが容易でない。したがって再生互換をとりやすいというDVD-RWの性質は, 非常に優れた点のひとつと言える。

また, DVD-RWのもうひとつの特長は, ディスクが比較的ローコストであるということである。家庭内のAV用途としての普及拡大を考えると, ディ

スクが安価であるほど望ましいが、それには製造コストが重要な要素である。したがって、ディスクメーカーがコストの低減を行いやすく、スムーズにディスクの低価格化が進行していくフォーマットであることが必要となる。製造工程がシンプルなDVD-RWは、そういった点で有利であり、家庭内録画メディアとして非常に適していると言える。

これらの特長は、DVD-RWの開発および規格化の推進を行う上での基本的なコンセプトでもあった。したがって、記録後のDVD-RWディスクの再生信号品質をROM型DVDと同等にすることや、ディスク製造時の容易性と製品ドライブでの記録安定性を兼ね備えるようにすることは、開発項目における重点課題であった。本稿では、それらを実現させるためには必要不可欠であるDVD-RWの要素技術について、記録レーザーのパルス制御とディスクの基板構造最適化およびプリフォーマット信号検出手法を中心に報告する。

表1 DVD-RWの物理特性

	DVD-ROM		DVD-R		DVD-RW	
	1層	2層	1層	1層	1層	1層
波長 [nm]	635 / 650					
NA	0.6					
反射率 [%]	45-85	18-30	45-85	18-30	45-85	18-30
変調度	≥0.6					
ジッター [%]	≤8					
トラックピッチ [μm]	0.74					
最短ピット長 [μm]	0.40	0.44	0.40	0.40	0.40	0.40
線速 [m/s]	3.49	3.84	3.49	3.49	3.49	3.49
容量/層 [Gbytes]	4.7	4.25	4.7	4.7	4.7	4.7

2. DVD-RW 概要

2.1 ディスク構造

DVD-RWのディスク構造を図1に示す。光学多層膜からなるディスクは、記録層を誘電体の保護層で挟み、反射層を重ねた4層構造となっている。記録層には相変化材料のひとつであるAgInSbTeが用いられており、保護層のZnS-SiO₂、反射層のAl合金とともに、スパッタリングにより透明基板上に成膜される。

記録膜の組成や各層の厚みは、ディスクの反射率、変調度、ジッター特性、くり返し記録特性、保存安定性、記録感度、位相差トラッキングエ

ラー振幅等、ディスク特性のバランスが最適になるように設計されている。

また、ポリカーボネート基板には、レーザービームを案内するための溝が形成されている。この溝のことをグループと呼び、溝と溝の間をランドと呼ぶ。図2に示すように、グループは、ある特定振幅、特定周波数でうねらせてあり、また、ランドには、ある規則に従った孤立ピットが形成されている。これらは、DVD-RWのプリフォーマットにおいて採用されているグループウォブルとランドプリピット(Land Pre-Pit:LPP)と呼ばれている。

グループウォブルは、そのウォブル信号成分を検出することで、ディスク回転制御やLPP検出の際のゲート信号生成に用いられる。一方、LPPにはプリアドレス情報等が入っており、記録時に必要な各種情報の取得や、高精度な記録位置制御に用いられる。また、これらを組み合わせることにより、記録用マスタークロックの生成を行うことも可能となる。

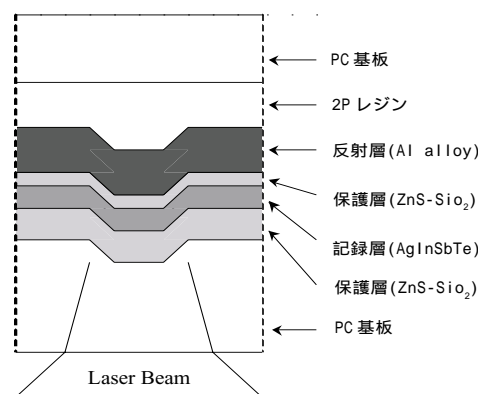


図1 DVD-RW ディスクの層構造

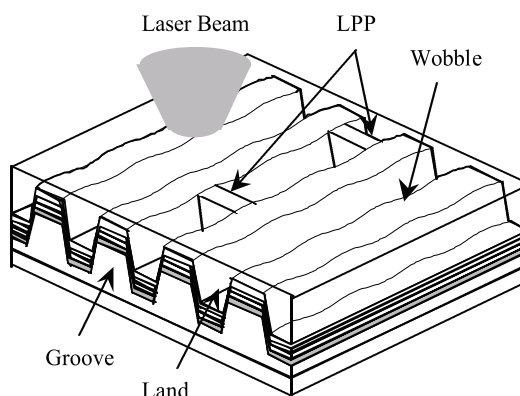


図2 DVD-RW ディスクの基板構造

これらのプリフォーマット信号は、ディスクからの戻り光の差動出力である Radial Push-Pull 信号から抽出することができる。図3でわかるように、LPP 信号がウォブル信号の頂点に位置するようにディスク上に配置されているので、ウォブル信号も LPP 信号も、適正なスライス信号により2値化が行われる。

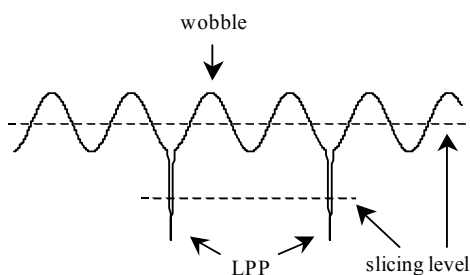


図3 Radial Push-Pull 信号

2.2 記録レーザー

記録に用いられる半導体レーザーは635nm帯と650nm帯の両方が規定されており、DVD-RWメディアは両波長での記録が可能である^{(4)・(5)}。ただし、635nmと650nmでは、ディスク面上でのレーザービームスポットサイズが波長比だけ異なるため、スポットの単位面積当たりの照射パワーも同様に異なる。したがって、いずれの波長で記録しても良好な再生信号品質を得るためには、記録レーザーパワーを波長に応じて適合させる必要がある。

前述したLPPのプリフォーマットデータには、記録機に対する情報として、記録波長帯に応じた記録レーザーパワーの推奨値が入れられている。それは、ディスク製造時にディスクメーカーによって与えられるものである。よって、記録機はその値を読むことで、記録に用いるレーザー波長におけるディスク固有の推奨レーザーパワーを知ることができる。

実際は、3値のパワーレベルを持った3種類のパルスからなるパルス列でもって記録は行われる。詳細は次章で述べるが、それらの情報についても最適な記録を行うための推奨値が、ディスクメーカーにより、あらかじめディスクに与えられるようになっている。

3 記録レーザーパルス制御

3.1 記録原理

DVD-RW ディスクに対する信号記録は、記録用レーザーのパワー変調によって行われる。記録時には、レーザーパワーは記録パワー、消去パワーおよびバイアスパワーの3段階で制御される。記録パワーで記録膜を溶融、急冷することにより反射率の低いアモルファスマークを形成し、消去パワーで記録膜を結晶化することにより反射率の高い領域を生成する。こうして得られた反射率の高低が、再生信号として検出される。このように記録膜の熱による相変化現象を利用しているため、加熱と冷却の速度が速いほどアモルファスマークの形成には有利である。したがってレーザーパルスの立ち上がり特性も重要な要素である。

この記録過程においては、記録パワーの照射された箇所にはアモルファスマークが、消去パワーの照射された箇所には結晶化領域がそれぞれ生成される。その際、記録される部分が元々アモルファスマークであったか結晶化領域であったかには依存されない。したがって、このメカニズムを用いることで上書きによる直接書換え(ダイレクトオーバーライト)が可能となる。

DVD-RWフォーマットでは、ライトストラテジと呼ばれる記録レーザーのマルチパルス変調が規定されている。それにより、形成される記録マークの熱分布制御が行える。記録パルス変調パターン(ライトストラテジ)と、ディスクに書き込まれたマークのイメージを図4に示す。熱による記録マーク歪みを低減し、ジッターの改善を図るためにマルチパルス記録を採用しており、トップパルス、マルチパルス列にクーリングパルスを付加した構成となっている。クーリングパルスは、記録マークで発生した熱の伝播を防ぎ、記録マーク後端の温度変化を急峻にすることでマーク後端のエッジをシャープにする効果がある。このストラテジパターンを採用することにより、トップパルス、マルチパルスおよびクーリングパルスの幅が、それぞれ記録マーク長によらず一定となる構成で良好な記録が行える。このシンプルな記録パ

ルスの構成は、システムの個体差や記録条件の違いによる影響を小さくし、記録再生特性の良好な再現性やディスクごとの最適ストラテジ設定のしやすさにも寄与している。

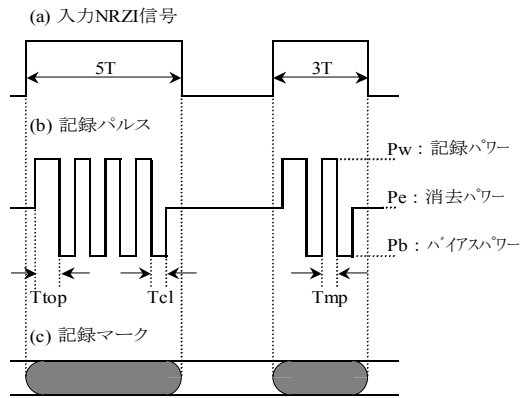


図4 ライトストラテジと記録マーク

3.2 記録パルス幅および記録パワー検討

各パルス幅に対する10回、1000回オーバーライト時の記録再生ジッターおよびアシンメトリの変化を図5に示す。クーリングパルス幅の変化に対しては、アシンメトリが0付近から離れるにつれてジッターが悪化する。ところがトップパルス幅に対しては、アシンメトリ変化は同等であるにもかかわらずジッターの-marginは狭い。これは記録マーク/スペースのエッジにずれが生じるため、書換え回数が多くなるほどその影響は大きくなる。最もmarginが狭いのがマルチパルス幅で、エッジずれ、さらにはマーク形状自体の歪みが顕著に現れる。したがって記録パワー・ストラテジの最適化に際しては、ある記録/消去パワーに対してトップパルス、マルチパルスの幅を調整することによりマーク/スペースのエッジをそろえ、クーリングパルス幅を変えることによりアシンメトリを適正に調整することができる。そのうえで記録再生特性、オーバーライト特性を評価し、最適値を設定している。記録/消去パワーの比を一定にした場合のpower marginを図6に示す。1000回と10回のオーバーライト特性は似たようなカーブを描いてはいるが、ボトムジッターを得るpowerが若干異なる。1000回のオーバーライトを考慮した場合の最適記

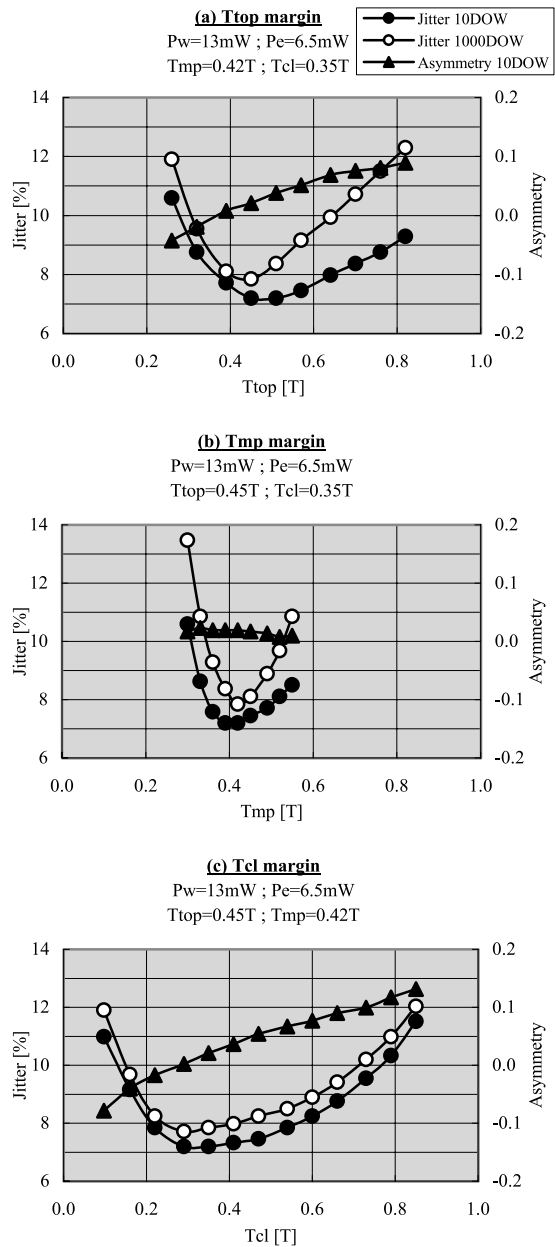


図5 ジッター・アシンメトリの記録パルス幅依存性

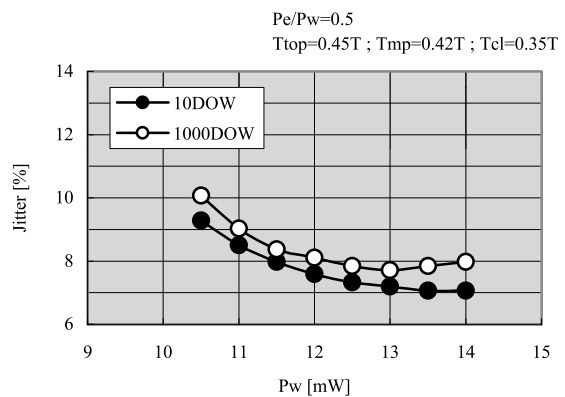


図6 パワーmargin

録パワーは、10回程度のオーバーライト時にボトムジッターが得られるパワーよりやや低い値に設定したほうが良いことになる。

4. ランドプリピット(LPP)形成条件の最適化

4.1 最適条件によるLPP形成

前述したように、DVD-RWディスクの記録制御を行ううえで、LPPは大切な要素のひとつである。したがって、本章ではLPPに着目して考察を行う。

DVD-RWディスク再生時にレーザビームがLPPを横切の際、その光はグループだけでなくLPPによっても回折される。すると、対物レンズ瞳上に現れる反射光の強度分布の中心は、LPPと反対の方向にシフトするようになる。図7は、ビームがLPPから離れている場合と真横にいる場合における、光検出器上に現れる光のファーフールド分布を示している。LPP側に位置する検出器AとDの出力信号は小さくなり、LPPと反対側に位置する検出器BとCの出力信号は大きくなる。よって、LPP信号はこれらの出力の差動信号(A+D)-(B+C)から検出される。一方、HF信号は総和信号A+B+C+Dから得られるが、その際LPPによって悪影響が与えられてしまうと、再生信号品質が悪化することになる。すなわち、再生信号に影響を及ぼさないような条件でLPPを形成

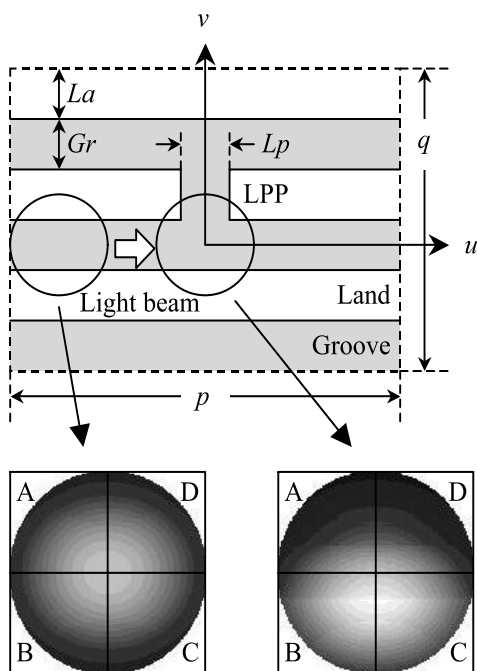


図7 単位セルとファーフールド分布

しなくてはならない。したがってLPPの設計条件は、DVD-RWディスクの記録再生品質を左右する重要なものであり、どのような条件でディスク上に形成するか十分な検討が必要である。

4.2 シミュレーション

このことについて、回折理論に基づいた光学シミュレーション⁽⁶⁾を用いて詳しく説明する。ディスクモデルを図7で示すような単位セルの単純な2次元繰り返し構造とすると、光検出器上の光強度分布 $I(x,y)$ は、

$$I(x,y) = \sum_n \sum_{m'} \sum_{n'} \exp \left[-i2 \left\{ \left(\frac{m-m'}{p} \right) u + \left(\frac{n-n'}{q} \right) v \right\} \right] \times R(m,n) R^*(m',n') \times f \left(x - \frac{m}{p}, y - \frac{n}{q} \right) f^* \left(x - \frac{m'}{p}, y - \frac{n'}{q} \right)$$

($m, n, m', n' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; *は複素共役)

と与えられる。なお、 $f(x,y)$ は対物レンズ瞳上の振幅分布を示している。また、 $R(m,n)$ をグループとランドの光学的位相差とすると、反射関数のフーリエ係数である $R(m,n)$ は次式で与えられる。

$$R(m,n) = \exp(i\phi) \frac{Gr}{q} \text{sinc}(\pi m) \text{sinc} \left(\frac{\pi m Gr}{q} \right) \times \left\{ \exp \left(i \frac{2\pi m}{3} \right) + \exp \left(-i \frac{2\pi m}{3} \right) + 1 \right\} + \frac{La}{q} \text{sinc}(\pi m) \text{sinc} \left(\frac{\pi m La}{q} \right) \times \left\{ \exp \left(i \frac{\pi m}{3} \right) + \exp \left(-i \frac{\pi m}{3} \right) \right\} + \left[\exp(i\phi) - 1 \right] \frac{Lp La}{pq} \text{sinc} \left(\frac{\pi m Lp}{p} \right) \text{sinc} \left(\frac{\pi m La}{q} \right) + \frac{La}{q} \text{sinc}(\pi m) \text{sinc} \left(\frac{\pi m La}{q} \right) \exp \left(-i \frac{\pi m}{3} \right)$$

光学系を無収差の理想形とした場合、グループの深さと幅とLPPの長さをパラメータとして、上式を用いて計算したのが図8である。これらのグラフは、LPPによって生じる総和信号の歪みと、差動信号から得られるLPP信号振幅を表している。

図8(a)の白い領域は、総和出力に歪みを持つ

好ましくない条件であることを示している。それは、再生信号のエラーの増加を引き起こすことになる。しかし色の濃い領域は、総和出力に歪みを持たない良好な条件であることを示している。その条件においては、(A+D)と(B+C)の信号出力におけるLPPの回折によって生じる変化は、互いに極性が逆で振幅が同じである。つまり、原理的に総和出力の歪みをほぼゼロとすることが可能なのである。実際の記録再生においては、歪み率が0.02以下の条件であれば、HF信号への影響は無視でき、LPPによるHF信号再生エラーは発生しない。

一方、図8(b)は、LPP信号の振幅を示すグラフである。LPP信号は差動信号(A+D)-(B+C)によって検出されるので、(A+D)と(B+C)出力のLPPによる変化分が大きいほど信号振幅も大きくなる。DVD-RW規格で定められているLPP信号振幅は0.18~0.27であるため、その値を示す領域がLPP信号振幅についての規格を満足していることになる。

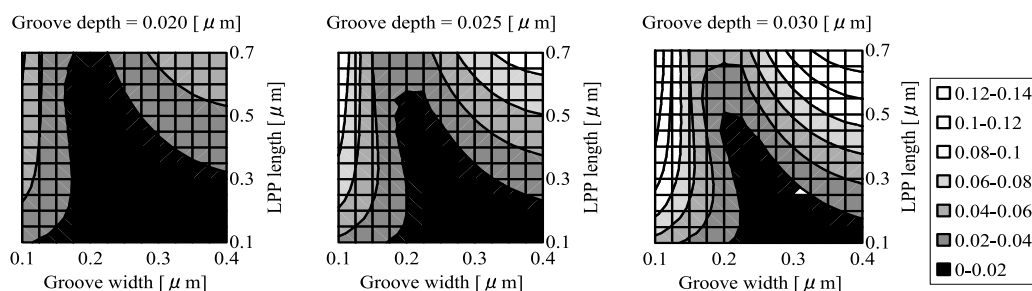
上述のシミュレーション結果から、総和信号の歪み率が0.02以下となり、かつLPP信号振幅0.18~0.27となる領域が、DVD-RWディスク構造にとって最適な条件であると言える。その条件に、

記録再生特性やPush-Pullトラッキングエラー振幅等を満足する条件を加え、グループの幅と深さとLPP長を選択すれば良いことになる。

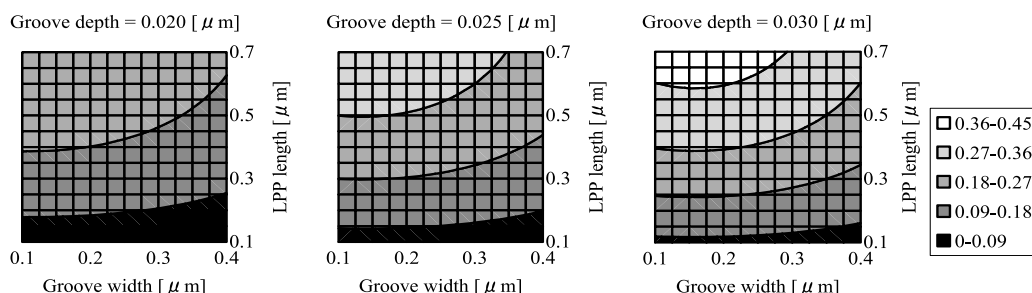
4.3 ディスク性能評価

図9(a)に示す波形写真は、LPPが最適条件ではない場合のRadial Push-Pull信号と記録前と記録後のHF信号である。LPPのある場所で記録前のHF出力に歪みが現れており、それが記録後にも同様な状態となっている。一方、図9(b)に示す波形写真は、シミュレーションで求めた最適LPP条件で作製したディスクの場合である。LPPによる影響が記録前にも記録後にも現れていないことがわかる。

次に、実験としてLPPを形成しないDVD-RWディスクを試作し、最適LPP条件で作成したディスクと比較評価した結果を表2に示す。2つのディスクの再生信号特性にはほとんど違いが無く、規格値に対して十分良好な値となっている。これは、総和信号に対して歪みを生じさせないLPP設計をすれば、HF再生信号品質に影響を与えないことを示している。したがって、LPP形成条件を最適化することにより、良好な再生信号特性と必要なLPP信号振幅の両方を得ることができる。



(a) distortion of summing signal



(b) signal amplitude of LPP

図8 光学シミュレーション結果

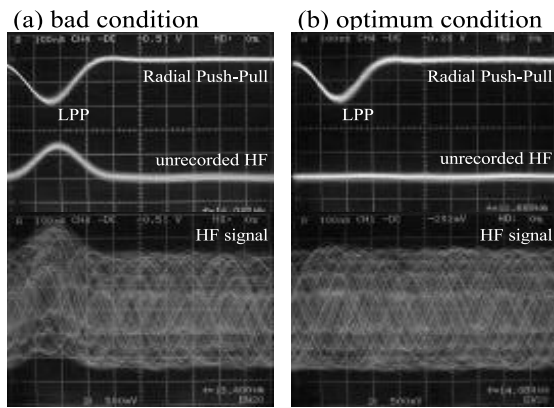


図9 LPP と HF 信号波形(LPP トリガ)

表2 比較評価結果

	規格値	LPPなし	最適条件LPP
反射率 [%]	18~30	20.3	20.2
変調度	≥0.6	0.701	0.687
ジッター [%]	≤8	6.91	6.69
PIエラー/8ECC	≤280	11	9
LPP 振幅	0.18~0.27	-	0.23

5 記録部の LPP 信号検出

5.1 記録後の LPP 信号検出可能範囲

記録マークが横に存在する部分の LPP 信号は、その記録マークの影響により振幅が小さくなる。また、隣接トラックに記録マークがあると、それがクロストークとして Radial Push-Pull 信号に現れてくる。したがって記録部の LPP 信号は、自らのトラックと隣接トラックの HF 信号の影響により、2 値化できる範囲が減少してしまう。つまり、LPP 信号を 2 値化するためのスライス信号設定マージンが少なくなるわけであり、未記録部に比べ LPP 信号検出が難しくなる。

HF 信号からのアドレス取得だけでは、記録後の保管状態が著しく悪かったディスクや、再生信号品質の悪い記録をされたディスクの場合は、HF 再生信号のエラーが多くなり、アドレスが取得できない場合がありえる。よって、記録部の LPP 信号からのアドレス取得を保証するために、DVD-RW 規格では、記録部 LPP 検出可能範囲の大きさを示す Aperture Ratio (AR) という項目が設けられている。AR は検出範囲の下限値が規定されており、最

低限の LPP 検出範囲が保証されている。

安定的な記録部 LPP の検出を行うためには、AR 値が大きいディスクほど有利であるが、記録機側でも LPP 検出範囲をさらに広くすることができれば、より一層のシステム安定性を高めることが可能となる。ここでは、今まで検討を行った記録部の LPP 検出可能範囲を広げる方法について述べる。

5.2 LPP 信号検出可能範囲の拡大方法

LPP 信号を検出する際に Radial Push-Pull 信号を用いるが、図 7 のような光検出器の場合、 $(A+D) - (B+C)$ ではなく、ある係数 K を用いた $(A+D) \times K - (B+C)$ という演算によって作成する。すると、自らのトラックの HF 信号成分がキャンセルされずに漏れ分が現れてくるが、隣接トラックの HF 信号成分の漏れとの極性の関係により、Radial Push-Pull 信号に現れるノイズ成分が LPP とは反対の方向に集まるようになる。ノイズ自体の量は多少大きくなるが、LPP 信号の検出可能範囲が広がるので有効となる。

また、4 つの光検出器に現れる LPP 信号成分の位相差をなくして LPP 信号検出範囲を拡大するという方法もある。図 7 に示すような LPP と光検出器の場合、各光検出器に現れる LPP 信号成分は、検出器 B と D が早く、検出器 A と C が遅い。これは、LPP が位相ピットであるために光の回折によって生じる現象である。よって $(A+D) - (B+C)$ の演算では、LPP 信号成分の位相差がある分だけ LPP 信号の振幅が小さくなる。したがって、B と D の信号出力の位相を A と C の信号出力と合わせてから演算すれば、LPP 信号振幅を大きくすることができる。具体的には、A、C との位相が合うように B、D を電氣的に遅延させた信号を作り、それを B'、D' とすれば、 $(A+D') - (B'+C)$ という演算をすることになる。なお、DVD-RW の記録マークは振幅ピットと見なしてよく、各光検出器の出力に位相差がないため、この演算を行っても HF 信号成分の漏れがさらに多くなることはない。これにより、各光検出器の LPP 信号成分の位相が合うので LPP 信号振幅が大きくなり、記録部の LPP 検出可能範囲を拡大させることができる。

標準的な DVD-RW ディスクについて、上述の演

算方法により作成した信号波形とAR測定値を図10に示す。ふたつの手法を組み合わせることで、LPP検出範囲が約2倍に拡大されている。したがってこの手法を用いることにより、アドレス取得の安定性を高めることができる。

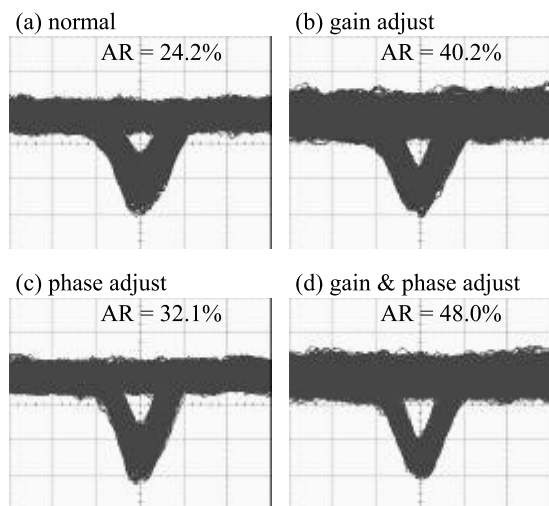


図10 記録部LPP波形(オシロスコープ連続表示)

6 むすび

DVD-RW開発における要素技術の中で、記録パルスストラテジ技術、LPP形成の最適条件検討、LPP信号検出手法について簡単に述べた。これらはいずれも重要な技術であるが、記録媒体の組成検討やディスクの層構造検討など、DVD-RW開発には必要不可欠な技術が他にも数多くある。そのような多数の技術開発によって、DVD-RW version1.0は規格成立を迎えることができた。

そして現在、より互換性を持たせることが可能となるフォーマットが検討されており、DVD-RW version1.1としてDVDフォーラムで規格化作業が行われている。そのための技術開発はすでに進められており、さらなる互換性を実現できるディスクおよび記録機が商品化されるのも遠くないであろう。

また、コンピュータ周辺機器としての応用や高速記録を可能とする技術開発も進められており、ディスク、ドライブ両方ともますます進化していくものと思われる。今後、DVD-RWが家庭内AV用として普及し、また多種多様な用途で使用される

ようになり、一時代を築く商品に成長していくことを期待する。

7 謝辞

本開発を進めるにあたり、協力をいただいた光技術センターおよび総合研究所ディスクシステム研究部の関係各位に感謝します。

参考文献

- 1) DVD Specifications for Re-recordable Disc Part1 Version 1.0
- 2) 村松, : "DVDレコーダーを支える光記録メディア DVD-RW", JAS journal, April 2000 No.4
- 3) 谷口, 井上, : "DVD-R/RWフォーマット", オプトロニクス, 1999.9 No.213
- 4) 加藤, 他 : "650nmLDによるDVD-RWの記録再生検討", 信学技報, Vol.99, No.330
- 5) M.Kato, et al. : "Study of the physical characteristics of DVD-RW with 650nm LD recording", PCOS'99, November 1999
- 6) H.H.Hopkins : "Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs", J. Opt. Soc. Am., Vol.69, No. 1, January 1974

筆者

加藤 正浩(かとう まさひろ)

- a. AV開発センター 光ディスクシステム開発部
- b. 1989年4月
- c. 光ディスクや光磁気テープの要素技術およびシステム開発を経て、現在DVD-R/RWの記録技術開発に従事

山口 淳(やまぐち あつし)

- a. AV開発センター 光ディスクシステム開発部
- b. 1995年4月
- c. 入社以来、DVD-R/RWの記録技術開発に従事

村松 英治(むらまつ えいじ)

- a. AV開発センター 光ディスクシステム開発部
- b. 1988年4月
- c. CDピックアップ開発設計、CD-Rディスク評価、記録用ピックアップ開発を経て、現在DVD-R/RWの記録技術開発・規格化に従事

谷口 昭史(たにぐち しょうじ)

- a. AV開発センター 光ディスクシステム開発部
- b. 1985年4月
- c. 光ディスク関連の開発(追記型、光磁気、相変化)を経て現在、DVD-R/RWの規格化業務に従事