The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	相変化光ディスクシステムの物理アドレス方式と高密度・高速・高信頼データ記録再生技術に関する研究
Author(s)	古宮, 成
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24947
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Osaka University Knowledge Archive

Title	相変化光ディスクシステムの物理アドレス方式と高密度・高速・高信頼データ記録再生技術に関する研究
Author(s)	古宮, 成
Citation	
Issue Date	
Text Version	ETD
URL	http://hdl.handle.net/11094/24947
DOI	
Rights	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

http://ir.library.osaka-u.ac.jp/dspace/

Osaka University

博士学位論文

相変化光ディスクシステムの物理アドレス方式と高密度・高速・高信頼データ記録再生技術に関する研究

古宮　成

2012 年 12 月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章　序論 1
1.1　はじめに 1
1.2　本研究の背景 1
1.3　本研究の目的と意義 4
1.4　本論文の構成 5
参考文献 7

第 2 章　メディアサンプルと光ディスク評価装置の開発 8
2.1　はじめに 8
2.2　相変化光ディスクシステムの記録再生原理 8
2.3　メディアサンプルの作製 12
2.4　光ディスク評価装置の開発 16
2.4.1　ライトチャネル 18
2.4.2　リードチャネル 22
2.5　評価指標 24
2.6　まとめ 27
参考文献 28

第 3 章　相変化光ディスクの物理アドレス方式の開発 29
3.1　はじめに 29
3.2　Land & Groove 記録に適した物理アドレス 29
3.2.1　Land & Groove 記録方式 29
3.2.2　CAPA (Complementary Allocated Pit Address) 31
3.2.3　単一ウォブルの併用 33
3.2.4　検出方式と検証結果 36
3.3　多層 Groove 記録に適した物理アドレス 40
3.3.1　ウォブルアドレス方式 40
3.3.2　STW (Saw Tooth Wobble) 41
3.3.3　MSK (Minimum Shift Keying)マークの併用 46
3.3.4　位相補正と 2 次歪み 49
3.3.5　検出方式と検証結果 54
3.4　まとめ 62
参考文献 62

第 4 章　高密度データ記録再生技術の開発 64
4.1　はじめに 64
4.2　パタン適応型記録補償方式 66
4.2.1　エッジシフト課題の要因解析 66
4.2.2　記録補償の方法と検証 72
4.2.3　4.7GB DVD-RAM への適用 77
4.2.4　3 層 100GB BD-RE への適用 81
4.3　まとめ 87
参考文献 88

第 5 章　高速データ記録再生技術の開発 89
5.1　はじめに 89
5.2　Te-O-Pd 材料の特性 89
5.3　L-Shape ライトストラテジ 90
5.3.1　500Mbps BD-R 高速記録の達成条件 90
5.3.2　記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度依存 95
5.3.3　2 層 BD-R メディアの 10 倍速記録 98
5.4　まとめ 103
参考文献 104

第 6 章　高信頼データ記録再生技術の開発 105
6.1　はじめに 105
6.2　記録条件の自動最適化 105
6.2.1　PLL を用いたエッジシフト検出の原理 106
6.2.2　ジッタ最小法の最適化アルゴリズム 109
6.3　再生および記録の指紋対策 112
6.3.1　エンベ加算 2 値化再生方式 113
6.3.2　Running-OPC 記録方式 116
6.4　再生ストレスマージンの拡大 119
6.4.1　ディスクチルトとサーボオフセット 119
6.4.2　PRML（Partial Response Maximum Likelihood）方式 119
6.5　まとめ 125
参考文献 125

第 7 章　結論 127
7.1　本研究の成果 127
7.2　波及効果と今後の展望 129

謝辞 134

本論文に関する主要業績 136
発表論文 136
国際会議発表 137
国内学会・研究会発表 138
日本特許（登録） 139
米国特許（登録） 142

略語対照表

略語	説明
A/D	Analog to Digital
ADIP	ADdress In Pre-groove
AV	Audio & Visual
BD-R	Blu-ray Disc - Recordable
BD-RE	Blu-ray Disc - REwritable
bER	bit Error Rate
BPF	Band Pass Filter
CAPA	Complementary Allocated Pit Address
CAV	Constant Angular Velocity
CD	Compact Disc
CD-R	Compact Disc - Recordable
CD-ROM	Compact Disc - Read Only Memory
CD-RW	Compact Disc - ReWritable
CLV	Constant Liner Velocity
CNR	Carrier to Noise Ratio
DSV	Digital Sum Variation
DVD	Digital Versatile Disc
DVD-R	Digital Versatile Disc - Recordable
DVD-RAM	Digital Versatile Disc - Random Access Memory
EO	Electro to Optic
EQL	Equalizer
FB	Feedback
fc	cutoff frequency
FF	Feedforward
HDD	Hard Disc Drive
ID	Identification
i-MLSE	integrated - Maximum Likelihood Sequenced Error
JM	Jitter Minimizing
LDD	Laser Diode Driver
LEQ	Limit Equalizer
LPF	Low Pass Filter
LPP	Land Pre-Pit

Mbps	Mega bit per second
MLSE	Maximum Likelihood Sequenced Error
MO	Magneto Optical
MPEG	Moving Picture Experts Group
MSK	Minimum Shift Keying
NA	Numelical Aperture
OPU	Optical Pickup Unit
PC	Personal Computer
PID	Physical Identification
PLL	Phase Locked Loop
PR	Partial Response
PRML	Partial Response Maximum Likelihood
Ps	spase Power
Pw	write Power
R	Recordable
RBW	Resolution Band Width
RE	REwritable
RLL	Run Length Limited
ROM	Read Only Memory
R-OPC	Running - Optimum Power Control
SEM	Scanning Electron Microscope
SHD	Second Harmonic Distortion
SHL	Second Harmonic Level
SNR	Signal to Noise Ratio
STW	Saw Tooth Wobble
Tecp	ending Time of cooling pulse
Telp	ending Time of last pulse
TEM	Transmission Electron Microscope
TIA	Time Interval Analyzer
Tp	Track pitch
Tr	rising Time
Tsfp	starting Time of first pulse
WPC	Writing Pulses Compensator
2Ts	spase of 2T length
3Tm	mark of 3T length

第1章　序論

1.1　はじめに

DVD（Digital Versatile Disc）に代表される典型的な光ディスクシステムは、信号記録層を備えた樹脂円盤に、対物レンズで回折限界まで絞った１μm 以下のレーザビームを非接触で照射することにより、GB（Giga Byte）クラスのディジタルデータを記録・再生する仕組みとしてよく知られている。光ディスクシステムは、データを記憶する可換媒体の「光ディスクメディア」と、光ディスクメディアにデータを記録・再生する駆動装置の「光ディスクドライブ」からなる。光ディスクメディアの信号記録面を光にかざすと美しい虹色の模様が見える。肉眼では確認できないが、サブミクロンの信号トラックが、物理フォーマットに従って規則正しく周期的に形成されているので、回折格子として作用し入射光が分光されるためである。また、光ディスクドライブの内部には、光記録の物理レベルにおいて相変化薄膜や半導体レーザ等のデバイスを最適に機能させるために、アナログ・ディジタル混在の巧みな信号処理方式が数多く導入されている。これらメディアの物理フォーマットとドライブの信号処理方式は、メディアとドライブの互換性を確保し、大量のデータを高品質に記録再生する光ディスクシステムに必須の基本技術である。

本論文は、著者がパナソニック株式会社（旧松下電器産業株式会社）において 1990 年代から参画した研究開発活動によって、書き換え型光ディスクシステムに好適な物理フォーマットと信号処理方式の提案と検証を実施し、その結果これまで実用化してきた DVD-RAM（Digital Versatile Disc - Random Access Memory）と BD-R/RE（Blu-ray Disc - Recordable / REwritable）システムの中で、特に、相変化光ディスクシステムの物理アドレス方式と高密度・高速・高信頼データ記録再生技術に関する研究成果をまとめたものである。

1.2　本研究の背景

光ディスクの光源に用いられるレーザは、1960 年の Maiman によるルビーレーザの発振 [1)] が最初の研究報告とされる。数年後、GE（General Electric）、IBM（International Business Machines）など複数の研究機関から GaAs 半導体レーザの極低温パルス発振が報告されたが、半導体レーザはそれから 10 年以上、光ディスクに使用可能な常温連続発振ができる完成度には至らなかった。

民生用光ディスクシステムの元祖は、1972 年にオランダのフィリップスが発表した光学式ビデオディスク VLP（Video Long Play）[2)] である。光源に He-Ne ガスレーザを用い、メディアは直径 30cm もあり、当時のドライブとメディア双方は大型だった。また、記録信号に FM 変調を用いたアナログ式の再生専用ビデオシステムであった。その後、1979 年に日本のパイ

オニアが家庭向けに改良し、Laser Disc（規格名は Laservision）として一般に普及した。

最初のディジタル式の民生用光ディスクは、1982 年にソニーおよびフィリップスが提案した音楽用 CD（Compact Disc）[3]である。光源には、初の大量生産品としてシャープが供給した波長 785nm の赤外半導体レーザ [4]を用い、メディアは直径 12cm に小型化された。CD は、取扱が容易で読み出しが非接触で劣化がないなどの優れた特徴を持ち、オーディオ分野に大きな技術革新をもたらした。急速に普及し、1986 年にはアナログレコードの生産数を上回った。また、データ用に拡張された CD-ROM（Compact Disc - Read Only Memory）は、PC（Personal Computer）のソフトウエア供給用に必要不可欠なメディアになった。しかし、再生専用型であるのでデータを後から記録できないという原理的な制約があった。

一方、記録型光ディスクも各種検討された。記録型光ディスクには、１度だけ記録が出来る追記型と、繰り返しオーバライトが可能な書き換え型がある。1989 年に太陽誘電は、追記型光ディスクとして CD-R（Compact Disc - Recordable）[5] を実用化した。有機色素の化学分解と基板の熱変形を併用する記録原理により、CD-ROM と再生互換のとれる高い反射率を実現した。CD-R はデータの配布やコピーを主用途として、CD-ROM ドライブで読み出し可能な互換性の高さから現在でも広く使用されている。データの改ざんが出来ないことは大きな特徴であるが、大容量の動画データを扱うには記録容量が足りないことと書き換えが不可能なことは課題であった。

また、1991 年には、光磁気記録方式の 3.5 インチ MO（Magneto Optical）ディスク [6]が書き換え型光ディスクとして実用化された。PC 専用の外部記憶装置として 100 万回以上の書き換え信頼性を特徴として普及した。しかし、MO は、独自構造の光学ヘッドを必要とし、オーディオや PC で一般化している CD との装置互換が困難であった。

一方、再生専用型も大きく改良された。1996 年、DVD[7]が複数メーカの参加する組織 DVD フォーラムから発表され、各社から DVD プレーヤが製品化された。DVD は、光源波長を 650nm に短波長化して記録容量を 4.7GB（CD の約 7 倍）に増大し、画像圧縮技術に MPEG-2（Moving Picture Experts Group - coding technology part 2: Video）[8]を採用することにより、ディジタル高画質映像を 2 時間以上記録できる。CD の容量不足の問題は解消されたが、ユーザが記録出来ない課題は残った。

更に、1997 年、記録膜に Ag-In-Sb-Te 相変化材料を用いた書き換え型光ディスク CD-RW（Compact Disc - ReWritable）[9]が発表された。CD-ROM と同じ 650MB の記録容量を有し、1000 回程度の書き換え回数を実現した。また、当時の記録データレートは CD の 1～4 倍速（1.2～4.8Mbps）であった。CD-RW を PC 用の書き換え型のデータファイルとして用いるには、記録回数の信頼性およびデータ記録速度の点で性能が不十分であった。

ここで、光ディスクの記録材料として、本研究に深く関わる相変化材料の研究経緯を述べる。1968 年、Ovshinsky はカルコゲナイド半導体薄膜材料の可逆相変化を初めて報告した [10]。

それは Te-As-Si-Ge 化合物からなる薄膜に電極を付けてパルス電流印加を行い、そのジュール熱によって薄膜の抵抗値が可逆変化する現象であった。次いで 1971 年、Feinleib らによる Ar ガスレーザ照射でも可逆相変化が確認[11]され、以降、相変化記録材料を用いた光ディスクの実現に向けた研究開発が活発化した。1980 年代前半、記録材料として TeGe 系の材料が報告されたが、結晶化速度が遅くダイレクトオーバライトできない課題や、保存寿命や繰り返し性能の点で課題を有していた。

そして 1987 年、書き換え型光ディスクの記録材料として、理想的な高速結晶化速度と繰り返し耐性を兼ね備えた相変化材料が報告された。Yamada らによる $GeTe\text{-}Sb_2Te_3$ 記録材料[12,13]である。Te、Ge、Sb 化合物の中で、特に GeTe と Sb_2Te_3 の擬 2 元系化合物のアモルファス薄膜材料は、相変化薄膜材料として次の物性をもつ。レーザ波長域に光吸収を持ち、レーザスポット照射により容易に結晶化温度～融点に昇温が可能である。アモルファスをガラス転移温度 Tg 以上に昇温すると高速（100ns 以下）に結晶化する。一方、結晶は、融点から Tg 以下に急冷却（-10^{11}℃/s）すればアモルファス化する。レーザ照射のパワーやパルス幅を制御すれば可逆変化が実現する（熱による相転移、図 1.1）。

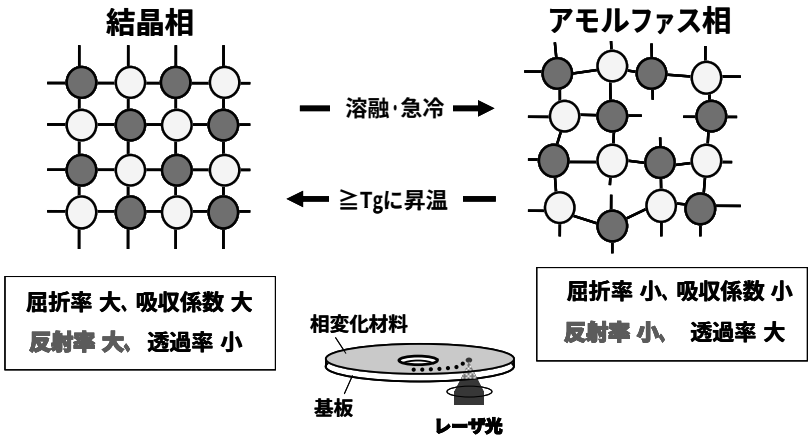


図 1.1 可逆相変化の原理

代表的組成の $Ge_2Sb_2Te_5$ アモルファス薄膜は、結晶化時間 50ns と高速であるので、数 10Mbps 以上の高速なデータ記録性能が見込める。一方、結晶化温度は 150℃より高く、常温で 30 年以上もアモルファス状態を維持できる安定性から、長期間データ保存が可能である。更に、相変化により大きな光学変化が得られるので、再生専用型の光ディスクと装置互換が容易である。従って、書き換え型光ディスクシステムを実現する極めて有効な材料と期待された。

以降、この GeTe-Sb_2Te_3 記録材料を用いた書き換え型光ディスクシステムの研究と実用化が本格化した。1990 年、本材料を用いた初の書き換え型光ディスクシステムとして、波長 830nm 赤外レーザを用いた容量 500MB の業務用データファイル PCR（Phase Change Rewritable）が実用化された。次いで、1995 年、CD-ROM を再生できる互換ドライブ形式で、容量 650MB の書き換え型光ディスク PD（Powerful optical Disc system）[14]が製品化された。これらのシステムは、文書や静止画データを記録するための記録容量や記録速度、10 万回以上のデータの書き換え信頼性を有しており、PC 外部記憶装置としての必要性能を満たしていた。一方、ディジタルビデオ録画への応用を想定した場合は、容量不足により記録時間が数 10 分程度しか得られなかった。データ量の膨大なディジタル動画の長時間記録を可能とするためには、書き換え型光ディスクの記録密度を 1 桁近く向上させる必要があった。ところが、当時そのような記録技術は未確立であり大きな研究課題であった。

1.3　本研究の目的と意義

前節で述べてきた光ディスクの研究と進化の延長線上に、1990 年代後半、AV（Audio & Visual）機器と PC（Personal Computer）間で動画や音声等を含む大容量ディジタルデータを自由に交換できる「AV&PC ブリッジメディア」を実現することが時代の要求となった。AV&PC ブリッジメディアでは、従来の光ディスクシステムが有した諸課題の解消が求められる。即ち、再生専用型光ディスクを同じドライブで扱える記録再生原理で、ディジタル動画データを格納するに十分な記録容量、かつ、データファイル用途に十分な記録速度と信頼性、これらすべての要求を満たす新規な書き換え型光ディスクシステムの開発が必要である。そのために著者らは、先に述べた GeTe-Sb_2Te_3 相変化記録材料を使いこなすことが最も確実な近道と考えた。

本研究の目的は、相変化原理に基づく書き換え型光ディスクシステムの理想的実現手段を追究し、相変化材料の持つ特徴とポテンシャルを最大限に引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶することができるメディア形態、ドライブ方式を具現化することである。それは、光ディスクメディアの物理フォーマットを考案し、メディアを駆動する光ディスクドライブの高密度・高速・高信頼なデータ記録再生技術を確立することで達成される。更に、確立された技術を用いて、光ディスクメディア、PC ドライブ、および、ビデオレコーダへ応用展開を図る（図 1.2）ことを最終目標とするものである。本研究成果による大容量光ディスクシステムは、民生用の AV&PC と共に、業務用データアーカイブ等の幅広い情報ストレージ分野への活用が期待できる。

図 1.2　本研究が扱う技術を応用した製品の例

1.4　本論文の構成

本論文は、以下の７つの章より構成されており、図 1.3 にその関係を図示する。

第 1 章（本章）は序論である。本研究の背景と従来課題を明らかにすると共に、本研究の目的と意義を述べている。本研究論文の章立てと全体構成を明確化している。

第 2 章は、本研究の遂行に必要な研究環境の構築について述べる。本研究のベースとなる相変化光ディスクシステムの原理を説明した後、メディアサンプルの作製、光ディスク評価装置の開発、再生信号の評価指標について明らかにする。

第 3 章は、相変化光ディスクに最適な物理アドレスの検討について述べる。高いデータ記録密度と優れたアクセス性能を兼ね備えた、相変化光ディスクメディアの物理フォーマットを実現するために、フォーマット効率と信頼性の両立する新しいアドレス方式を提案し検証する。

第 4 章は、高密度記録を実現するために開発したデータ記録再生技術について述べる。Ge-Sb-Te 相変化材料の書き換え型メディアを用いて、符号間干渉（熱、光学）で生じる記録マークのエッジシフトを効果的に補償するパタン適応型記録補償方式を提案し検証する。

第 5 章は、高速記録を実現するために開発したデータ記録技術について述べる。Te-O-Pd 相変化材料の追記型メディアを用いて、BD の 8 倍速および 10 倍速記録を達成する L-Shape ライトストラテジを提案し検証する。

第 6 章は、高い信頼性を実現するために開発したデータ記録再生技術について述べる。量産メディアやドライブのばらつきに対する互換性確保や、外乱ストレス（指紋付着、チルト、オフセット）に対するマージンを拡大するドライブ信号処理方式の提案と検証を行う。

第 7 章は、本研究で得た成果の総括を行い結論を述べる。さらに今後の光ディスク技術の展望について述べる。

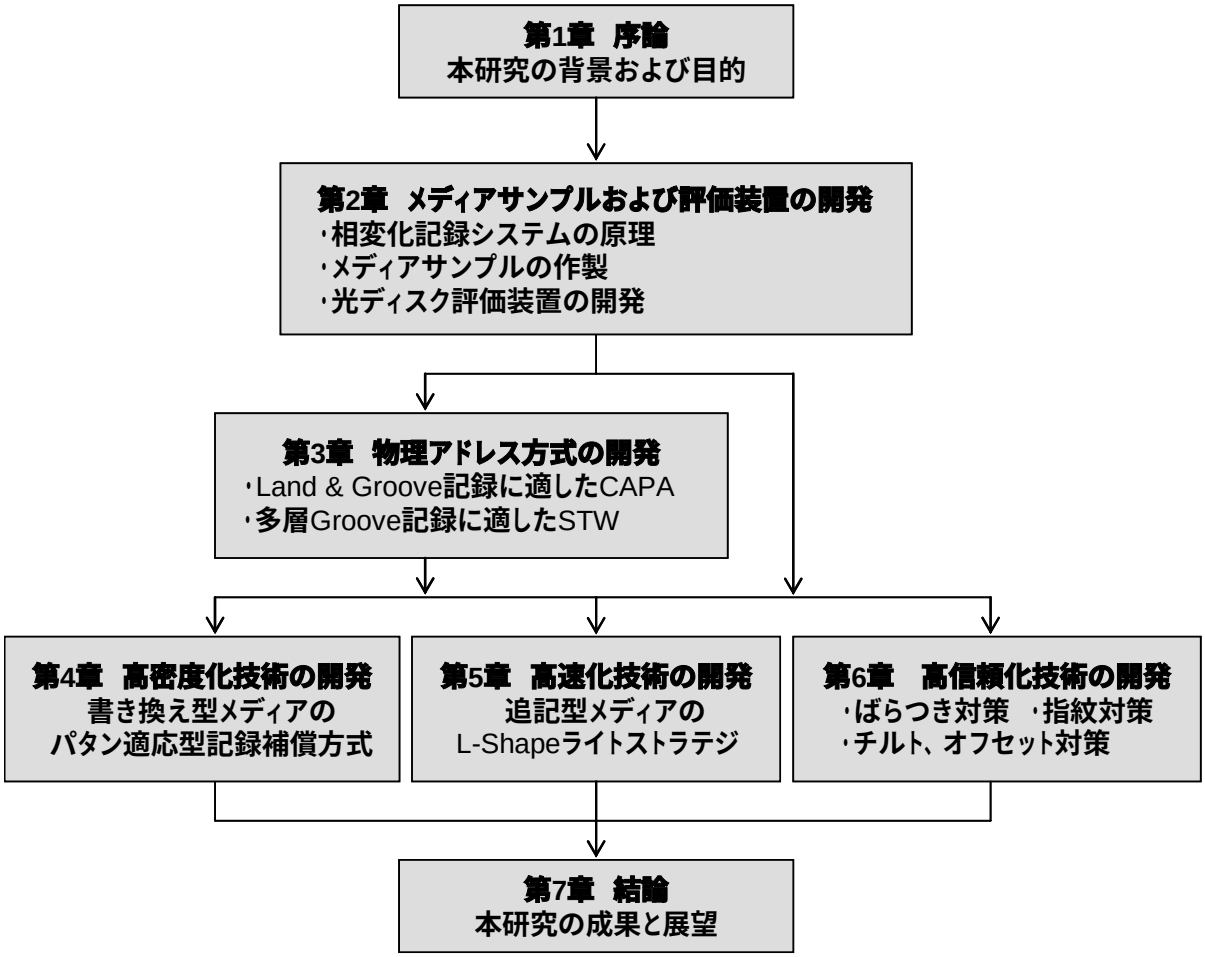

第1章　序論
本研究の背景および目的
第2章　メディアサンプルおよび評価装置の開発
・相変化記録システムの原理
・メディアサンプルの作製
・光ディスク評価装置の開発
第3章　物理アドレス方式の開発
・Land & Groove記録に適したCAPA
・多層Groove記録に適したSTW
第4章　高密度化技術の開発
書き換え型メディアの
パタン適応型記録補償方式
第5章　高速化技術の開発
追記型メディアの
L-Shapeライトストラテジ
第6章　高信頼化技術の開発
・ばらつき対策　・指紋対策
・チルト、オフセット対策
第7章　結論
本研究の成果と展望

図 1.3　本論文の構成

参考文献

1) T. H. Maiman: “Stimulated Optical Radiation in Ruby”, Nature **187** (1960) 493.
2) K. Compaan and P. Kramer: “The Philips 'VLP' System”, Philips Tech. Rev. **33** (1973) 178.
3) 中島平太郎、小川博司: “図解コンパクトディスク読本”, オーム社 (1982).
4) 山本三郎: “半導体レーザ誕生秘話”, シャープ技報 **99** (2009) 52.
5) E. Hamada, Y. Shin, and T. Ishiguro: “CD-Compatible Write-Once Disc With High Refrectivity”, Optical Data Storage 1989 (ODS’89), Proc. SPIE **1078** (1989) 80.
6) 金子正彦: “基礎講座 <光ディスク> 光記録媒体(2) 光磁気記録媒体”, 応用物理 **69** (2000) 76.
7) 徳丸春樹、横河文彦、入江満: “図解 DVD 読本”, オーム社 (2003).
8) ISO/IEC 13818-2:2000(E): “Information Technology - Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information: Video”, Part 2 (2000).
9) H. Iwasaki, Y. Ide, M. Harigaya, Y. Kageyama, and I. Fujimura: “Completely Erasable Phase Change Optical Disk”, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) 461.
10) S. R. Ovshinsky: “Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures”, Phys. Rev. Lett. **21** (1968) 1450.
11) J. Feinleib, J. deNeufville, S. C. Moss, and S. R. Ovshinsky: “Rapid Reversible Light‐Induced Crystallization of Amorphous Semiconductors”, Appl. Phys. Lett. **18** (1971) 245.
12) N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi, N. Akahira, K. Nagata, and M. Takao: “High Speed Overwritable Phase Change Optical Disk Material”, Jpn. J. Appl. Phys. **26** Suppl. 26-4 (1987) 61.
13) 山田昇: “相変化光メモリ材料とその応用に関する研究”, 学位論文, 京都大学大学院工学研究科 (2000).
14) R. Imamura, Y. Okazaki, T. Saimi, I. Kawamura, T. Ohta, and S. Nishino: “PD (Powerfull Optical Disk System) for Multimedia”, Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 490.

第2章　メディアサンプルと光ディスク評価装置の開発

2.1　はじめに

本章では、相変化原理に基づく書き換え型光ディスクシステムの理想的実現手段を追究するために必要な研究環境の構築について述べる。まず、以降の研究のベースとなる相変化光ディスクシステムの全体構成とデータ記録再生原理を説明する。次いで、本研究のメディアおよびドライブに関する方式提案と検証を行う方法を述べる。その方法は、始めに、相変化光ディスクのメディアサンプルを作製する。次に、本研究の主課題である物理アドレス方式や、高密度・高速・高信頼なデータ記録再生技術を検証するために、ドライブの標準機として光ディスク評価装置を構築する。そして、光ディスク評価装置を用いてメディアサンプルにテスト記録し再生評価する。提案した方式または技術を性能評価するために、光ディスクシステムの再生信号に適した評価指標を導入して定量的に把握する。また、必要に応じて、メディアサンプルに形成された記録マークを電子顕微鏡により直接観察する。

2.2　相変化光ディスクシステムの記録再生原理

記録再生原理の説明に先立ち、本研究の相変化光ディスクの属性を明確化する。表 2.1 に示すように、光ディスクは、大きく分けて再生専用型（ROM: Read Only Memory）、追記型（R: Recordable）、書き換え型（RE: Rewritable）の 3 種類に分類される。再生専用型は、凸凹ピット構造を記録原理とし、原盤から同一の内容が大量複製されるメディアであり、音楽・映画・PC ソフトウエアなどの配布に使われる。一方、追記型は、別名をライトワンス型（Write Once）とも言い、不可逆な物理変化を記録原理としている。記録材料は、CD-R、DVD-R は有機色素系であるが、BD-R では耐光性に優れる相変化材料を用いたものが主流である。未記録領域への追記は可能であるが、一度記録したデータの消去（改ざん）が出来ないことが大きな特徴であり、データのバックアップや長期保存に用いられる。また、書き換え型は、代表的な記録原理として相変化と光磁気がある。相変化は、記録膜材料の結晶とアモルファス間の相転移を情報記憶に用いるが、記録された信号マークの物理相状態の耐環境安定性が優れ、書き換えと長期保存が両立できることが特徴である。光磁気は、100 万回以上の繰り返し記録の耐久性に優れ、音楽用 MD（Mini Disc）や PC データ用 3.5 インチ MO が実用化されている。但し、現在では ROM 型光ディスクとの装置互換性に有利な相変化が書き換え型の主流となっている。本研究で取り扱う光ディスクは、分類が書き換え型と追記型に属し、記録原理が相変化のものであり、具体例としては、DVD-RAM、BD-R、BD-RE である。

表 2.1 光ディスクの分類

分類	記録原理	フォーマット名称	主な用途
再生専用型 (-ROM)	凸凹ピット構造	CD-ROM DVD-ROM BD-ROM	ソフトウエア、 音楽、映画配布
追記型 (-Recordable)	有機色素 (化学分解、変形)	CD-R DVD-R BD-R (LtoH)	データ、 録音、録画保存
	相変化 (アモルファスと結晶)	BD-R	
書き換え型 (-REwritable)		CD-RW DVD-RW DVD-RAM BD-RE	データ、録画書換
	光磁気 (偏光カー回転効果)	MD (Mini-Disc) MO (3.5inch)	録音 データ書換

本研究のベースとなる相変化光ディスクシステムの記録再生原理を説明する。図 2.1 に、相変化光ディスクシステムの全体構成図を示す。この内、本論文の主たる研究対象は、図中に点線で示す範囲である。

まず、典型的な相変化光ディスクメディアとして BD-RE を例として述べる。メディアは、直径 12cm 厚さ 1.2mm ポリカーボネイト製の円盤で、厚さ 1.1mm 基板と厚さ 0.1mm カバー層の間に記録膜をサンドイッチした構成である。記録膜は、スパッタリングにより材料ターゲットから薄膜積層する。基本的な記録膜構成は、光の入射側から見て 4 層あり、入射側保護層（例えば $ZnS\text{-}SiO_2$、厚さ約 50nm）、相変化記録層（例えば $Ge_2Sb_2Te_5$、同 20nm）、反射側保護層（例えば $ZnS\text{-}SiO_2$、同 20nm）、金属反射層（例えば Ag 合金、同 100nm）である。製品化されている相変化光ディスクメディアでは、信号特性や耐久性を向上させるために更に追加の界面層を設けており、実際の記録膜の積層数は 6～10 層になる場合がある。この光ディスクメディアの基板には、スパイラル（渦巻き）状の連続したグルーブ（溝）の信号トラックが形成されており、レーザビームを記録層に追従走査させる役割がある。更にグルーブには、メディア全周にわたる信号トラック位置を識別するためにウォブル（蛇行変調）によりアドレス（番地）を埋め込んでいる。

次に、光ディスクドライブについて述べる。ドライブの構成は、メカサーボ系、OPU（Optical Pickup Unit）、記録再生信号処理部、アドレス検出部、ディジタル処理部、ディスクコントローラ、インタフェイスからなる。メカサーボ系は、メディアの回転駆動を行うスピンドルモ

ータと、OPU をディスクの半径方向に移動させるトラバース機構と、OPU の対物レンズアクチェータを、サーボ DSP（Digital Signal Processor）によりそれぞれ制御する。OPU は、半導体レーザの出射光を対物レンズで回折限界まで集光してメディアの記録膜に照射し、情報の記録と再生を行う。対物レンズは、フォーカス方向とトラッキング方向の 2 軸のアクチェータで支持されており、メディアの信号トラックに対してレーザスポットをサーボ追従させる。PIN（P Intrinsic N）フォトダイオードは、ディスクからの再生反射光を光電変換し再生 RF 信号を得る。記録再生信号処理部のライトチャネルは、変調後のデータを多値パルスの記録信号に変換する記録補償と、記録信号に対応して半導体レーザのパワー制御とパルススイッチングを行うレーザ駆動からなる。記録再生信号処理部のリードチャネルは、再生 RF 信号を波形等化するイコライザと、アナログ信号をディジタルデータに戻す 2 値化／PRML（Partial Response Maximum Likelihood、後述）からなる。アドレス検出部は、走査している信号トラックのトラッキング差動信号からウォブル成分を抽出しアドレスとクロックを再生する。ディジタル処理部は、記録時に誤り訂正コードを付加することにより、再生時のエラーを正しいデータに戻すエラー訂正、ユーザデータを光ディスクに効率よく格納するための変調・復調を内蔵する。通常、光ディスクのデータ変調では、RLL（Run Length Limited）制御と DSV（Digital Sum Variation）制御をおこなう。RLL 制御は、記録データのラン長（0 又は 1 が連続する個数）を所定数に制限し、生成されるデータ列のスペクトラムを低域通過型の光ティスクに整合させる。また、DSV 制御は、記録データ列の 0 又は 1 の出現頻度を平均化し、信号が DC 成分を持たないようにすることによってレーザビームのサーボ動作を安定化させる。ディスクコントローラはドライブ全体の制御を司る。そして、インタフェイスは、パソコンやビデオレコーダバックエンドなど、外部機器からのデータおよびシステムコマンドを ATA（Advanced Technology Attachment）規格などを介して入出力する。

次に、記録と再生の原理と動作について述べる。書き換え型光ディスクの記録は、記録と同時に下地のデータを消去するダイレクトオーバライト（DOW: direct overwrite）で行われる。ライトチャネルが生成する記録信号に応じて半導体レーザをパルス状に強度変調し、その出射レーザ光を回転する光ディスクの記録膜に回折限界の約 0.3μm 径に絞って照射する。図 2.2 に、レーザスポットが記録膜上を移動したときの記録膜の温度変化の概念図を示す。記録時は、強い Peak パワーのパルスレーザ照射により相変化材料が融点の約 650℃以上まで昇温され、一旦溶融し、急冷（急速に放熱）することによりアモルファス化記録マークが形成される。一方、消去時は、中程度に強い Bias パワーの DC レーザ照射により、記録膜が結晶化温度の約 200℃以上に保たれ、下地のマークが結晶化消去される。一方、再生は、相変化が起きない弱いレーザ光を信号トラックに連続照射し、マークの形成されたアモルファス部とスペースの結晶部の反射率の違いを光量変化として検出する。

以上のメディアおよびドライブの構成と記録再生原理により相変化光ディスクシステムは実現されている。

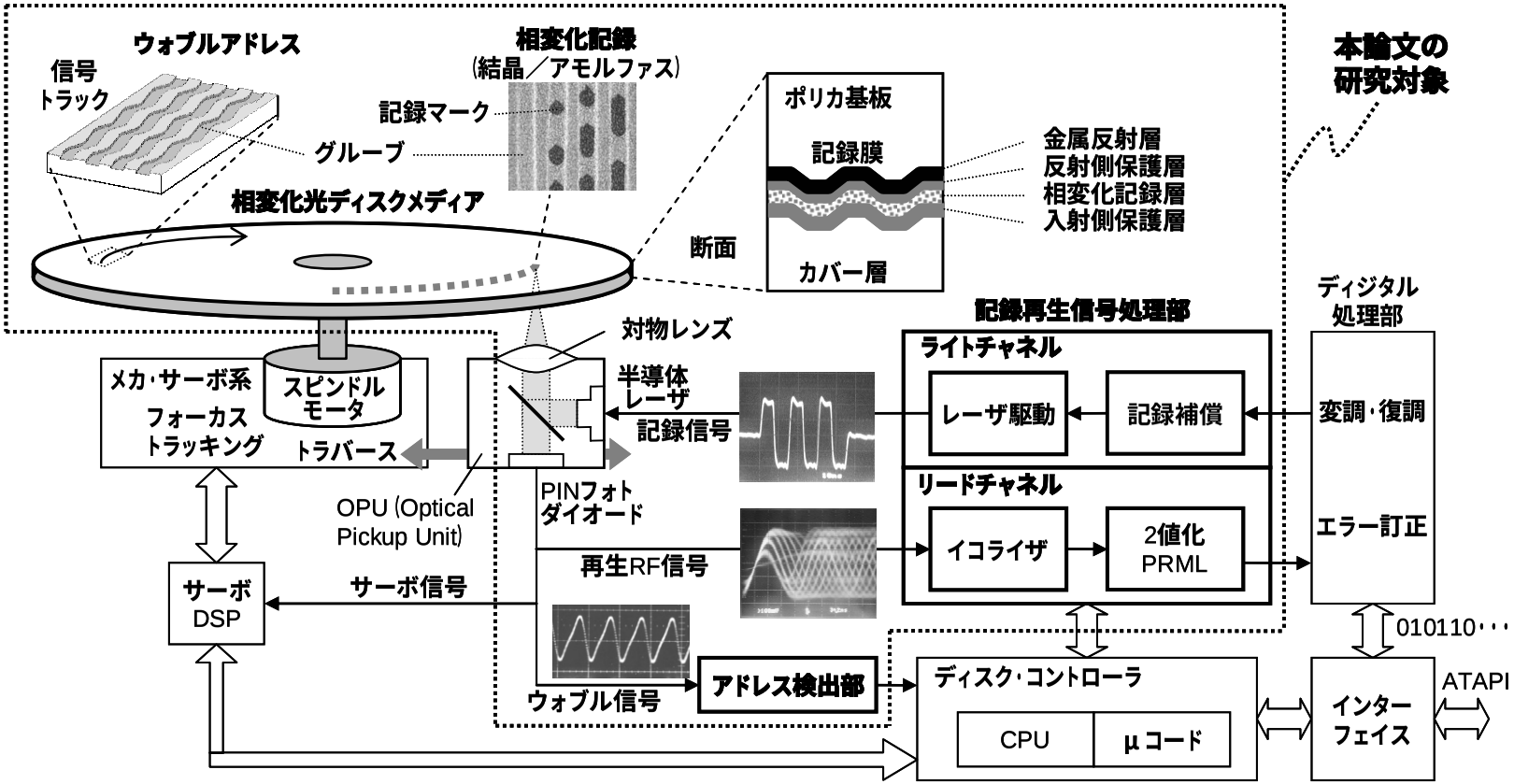


図2.1 相変化光ディスクシステムの全体構成図

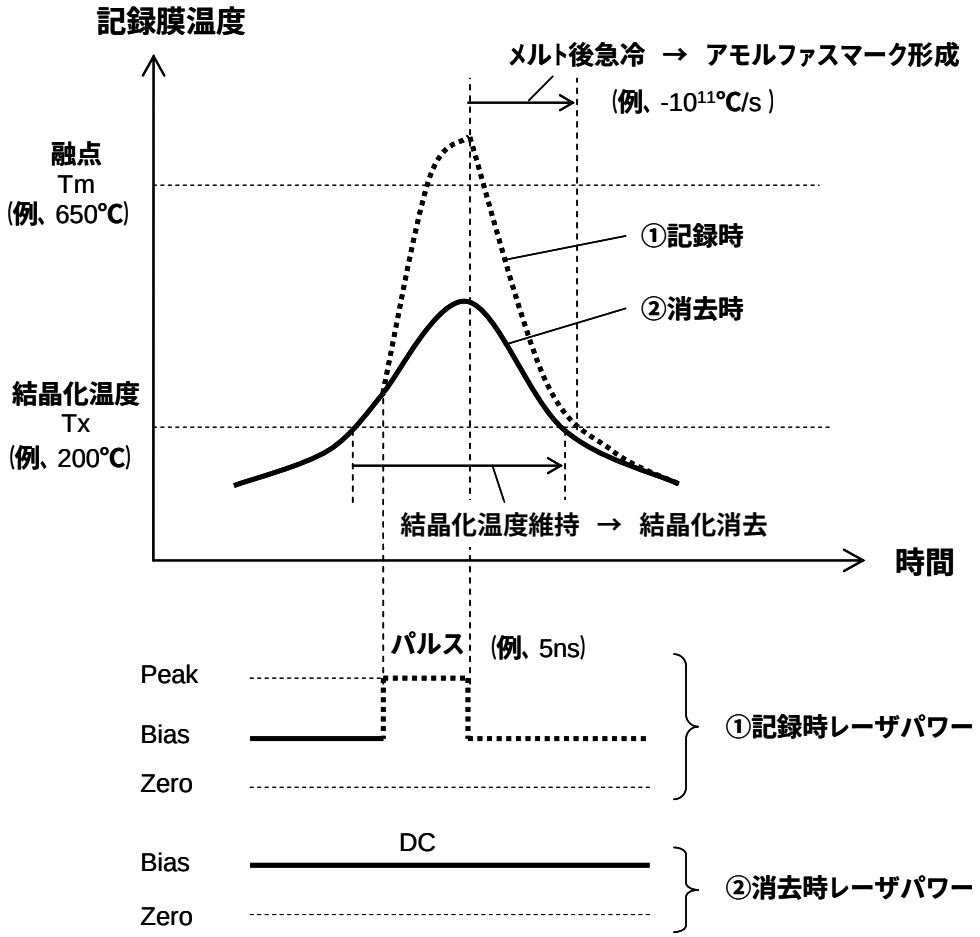


図 2.2 レーザ照射と相変化記録膜の温度変化概念図

2.3 メディアサンプルの作製

メディアサンプルの作製方法について順に述べる。最初に、信号トラックを形成した樹脂基板を用意する必要があるが、基板の元となる原盤作製から説明する。原盤の初期状態は、ガラスディスクの表面を超高精度に平坦研磨し、フォトレジストをスピンコート法で塗布する。図 2.3 に原盤のカッティングマシンの原理構成を示す。実際のカッティングマシン [1)]では、更に、種々の光学部品（レンズ、ミラー、波長板、ビームエクスパンダー等）、検出器（ディテクタ、CCD カメラ等）、安定化装置（レーザノイズイータ、温度制御器、アクティブ防振装置等）を必要とするが、原盤のカッティング原理のみを説明するため簡略化して描いた。光源は、サブミクロンのトラック幅に対応するため、波長の短い Ar イオンレーザの UV 光（Ultra Violet、λ=351nm、DVD 用）または 2 次高調波の DUV 光（Deep Ultra Violet、λ=248nm、

BD 用）を用いる。レーザビームをパルス変調するために EO 変調器（Electro to Optic modulator）を用い、グルーブの断続やピット変調を行う。また、グルーブにアドレス信号を埋め込むために、レーザビームを微少に光軸変調する EO ディフレクタ（Electro to Optic deflector）を用い、記録ビームを原盤の半径方向に揺らして CAPA（Complementary Allocated Pit Address）のオフセット変調や STW（Saw Tooth Wobble）のウォブル変調を行う（CAPA や STW は次章で説明する）。原盤記録用の OPU はドライブ用と異なり、トラッキング制御を持たず、また、フォーカスは記録ビームと独立に He-Ne レーザによりフォトレジストを感光させないで行う。記録ビーム径を可能な限り小さくするため高 NA（Numelical Aperture：開口数）の対物レンズ（NA=0.9）を用いる。カッティングフォーマッタ信号源の指令に基づく原盤カッティングの方法は、スピンドルモータを所定の回転数で回し、原盤 1 回転毎に精密トラバース系をトラックピッチ分だけ定速移動させながら、EO 変調器と EO ディフレクタに物理フォーマットに従った同期信号を送ることによって、フォトレジストを渦巻き状に露光していく。図 2.4 に露光状態とカッティングフォーマッタ信号の関係例を示す。

記録後、現像して露光部分を除き、厚め（約 0.3mm）の Ni メッキを施してから剥離し、凹凸逆転した Ni スタンパを作製する。スタンパを成型機にセットし、溶融させたポリカーボネイト樹脂に加圧成形して、信号トラックやピットが転写された樹脂基板を作製する。

次に、基板上へ記録膜を形成するためにスパッタリング法を用いる。スパッタ装置に薄膜組成とほぼ同等の混合物か合金のターゲットを設置し、Ar ガスを導入しながら基板に堆積させる。誘電体は RF スパッタ法、金属膜や相変化膜では DC スパッタ法を用いる。スパッタ直後の相変化膜はアモルファス状態である。

記録膜を形成後、樹脂カバー層を設ける。カバー層は UV 硬化樹脂の塗布か、樹脂基板の接着で行う。最後に、書き換え型メディアの場合は、ディスク全面を DC レーザ照射により結晶状態に初期化する。追記型メディアの場合は初期化しない。本研究では、以上の方法によりサンプルメディアを作製した。一連のディスク作製プロセスを図 2.5 に示す。

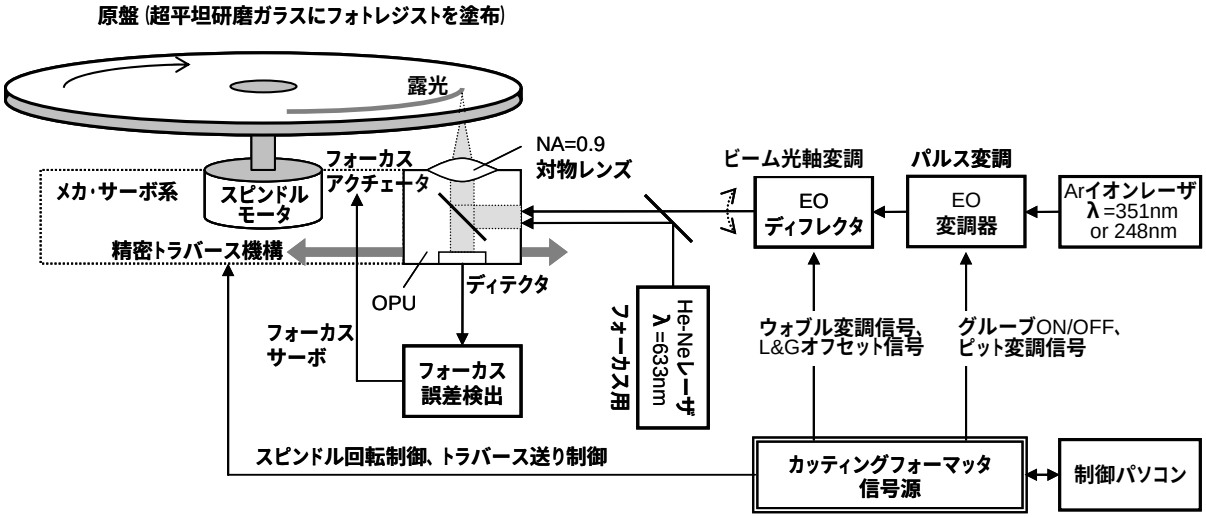


図 2.3　原盤カッティングマシンの原理構成

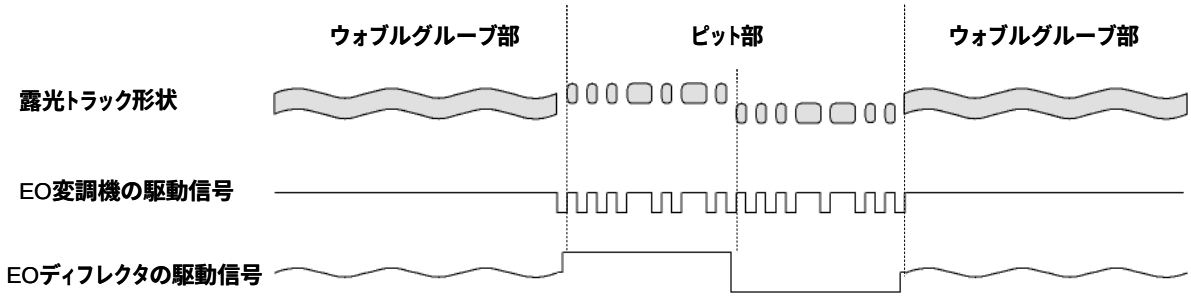


図 2.4　露光状態とカッティングフォーマッタ信号の関係

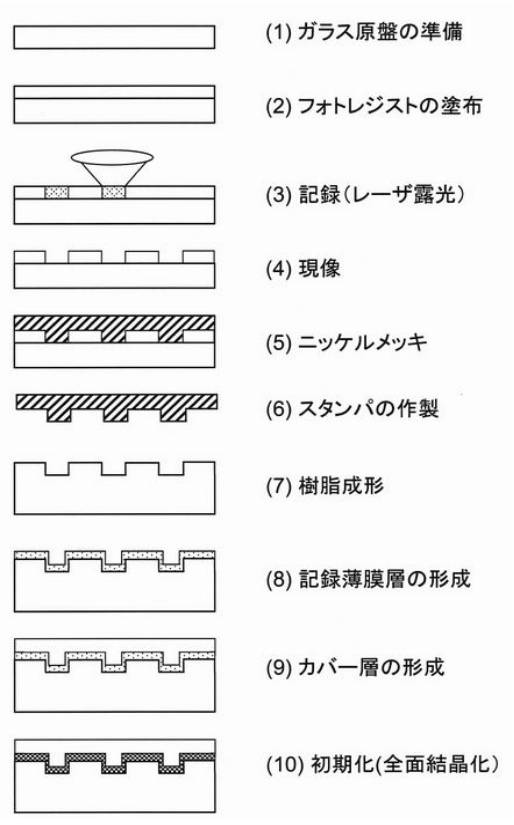


図 2.5　サンプルディスク作製プロセス

2.4　光ディスク評価装置の開発

光ディスク評価装置は、メディアサンプルを特性評価するレファレンスドライブとしての役割と、光ディスクドライブの記録再生処理方式の原型回路を開発・検証するためのプラットフォームとしての役割を担う。本研究の光ディスク評価装置は、パルステック工業製の OPU-1000 をベースにして（図 2.6)、パナソニックが開発した光ピックアップを搭載し（図 2.7)、これに本研究で独自開発した記録再生信号処理回路を追加接続し（図 2.8)、更に、オシロスコープ、TIA（Time Interval Analyzer）[2)]などの汎用測定機と、制御・データ処理用の PC を組み合わせた総合システムとして構築した。記録再生信号処理のブロック図を図 2.9 に示す。

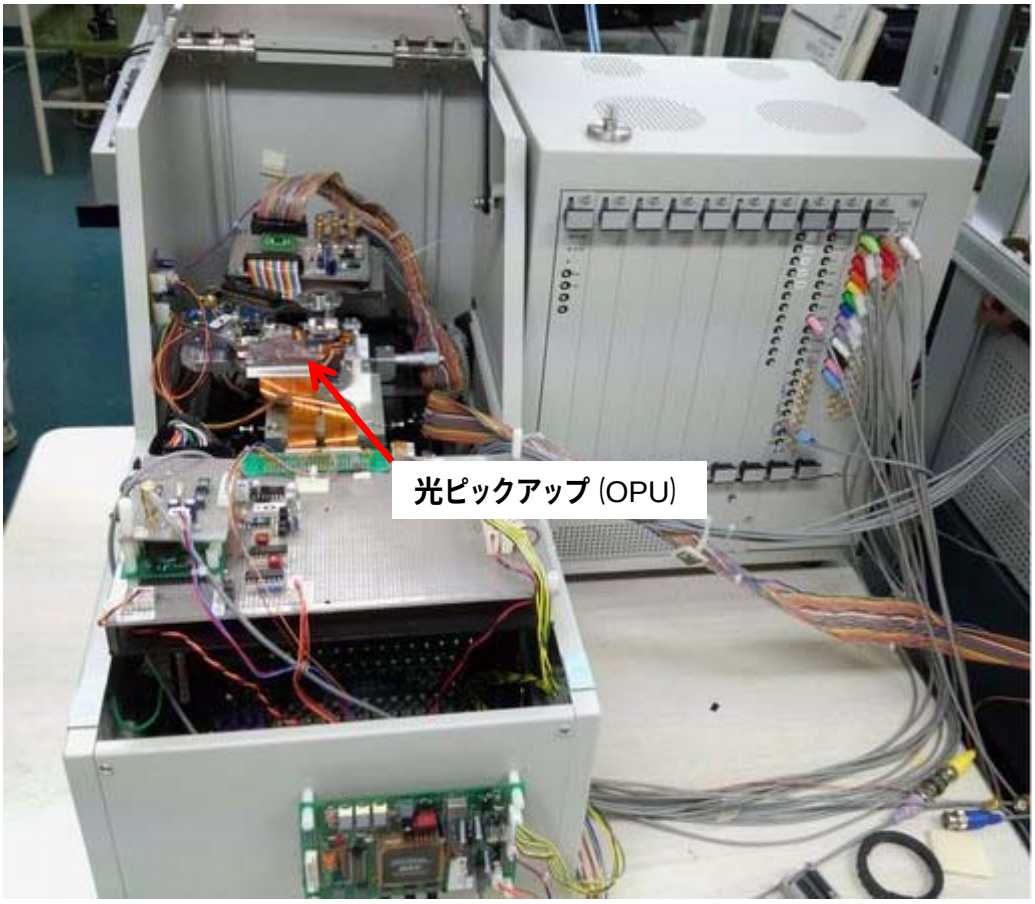


図 2.6　光ディスク評価装置 OPU-1000

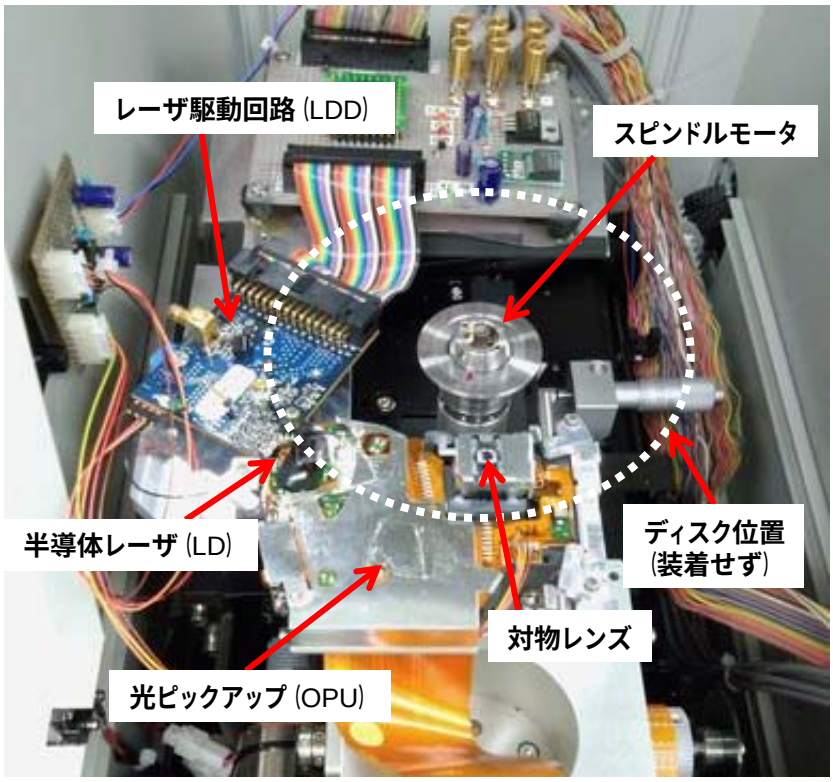


図 2.7　光ディスク評価装置　OPU 周辺

図 2.8　光ディスク評価装置　記録再生信号処理部

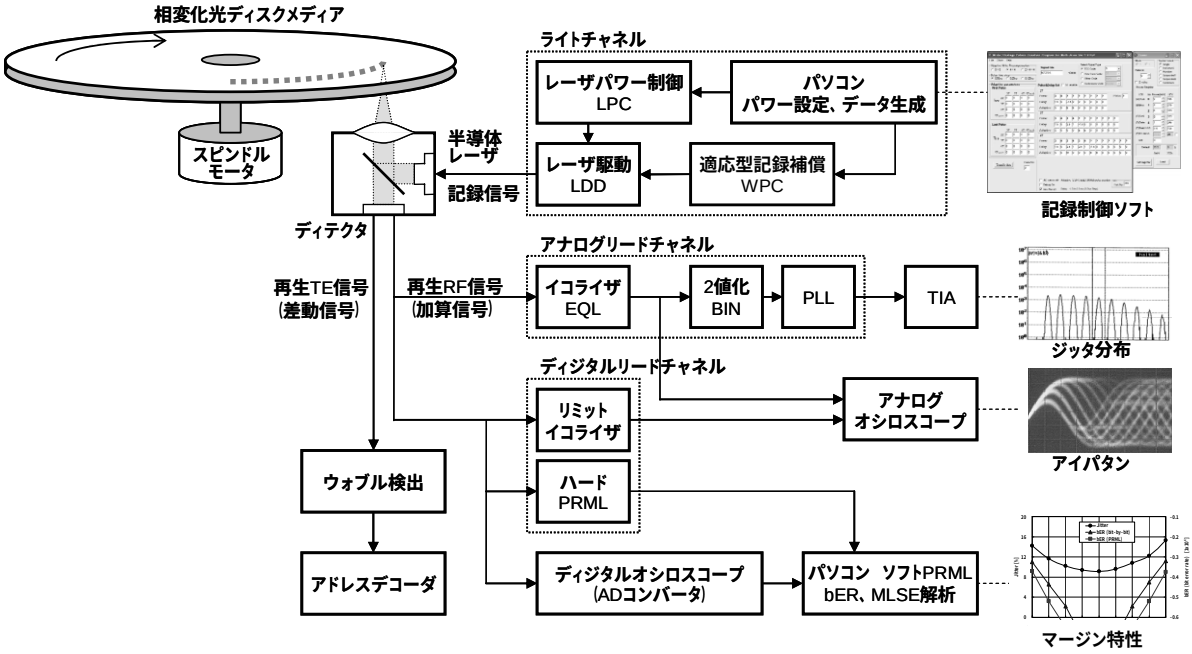


図 2.9 光ディスク評価装置の記録再生信号処理のブロック図

2.4.1 ライトチャネル

図 2.9 において、ライトチャネルは、半導体レーザを駆動するための記録信号を生成する部分である。適応型記録補償回路（WPC：Writing Pulses Compensator）[3)]は、記録データパタンに適応して記録パルスエッジを動的に補償する機能を有し（第 4 章で詳しく述べる）、正確な時間精度でパルスを生成する。また、レーザ駆動回路（LDD：Laser Diode Driver）は、高速トランジスタを用いた差動スイッチング回路と定電流源の組み合わせを複数チャネル並列接続し、その加算電流で半導体レーザを多値パルス駆動する。図 2.10 は WPC と LDD の動作概念図である。図 2.11 は基本記録パルスと補償された記録レーザパルスの関係を示す。任意の間隔に時間軸補償された記録レーザパルスは、以下の順に生成される。①記録クロックからクロック単位の基本記録パルスを作り、②プログラマブル遅延素子を通してクロックエッジ毎に遅延値を補償した遅延クロックを作成し、③前記基本記録パルスを遅延クロックによって精密にラッチし、④3 値のスイッチング電流源によって半導体レーザを駆動する。

実際の WPC 回路基板（図 2.12）では、800MHz 以上の高速動作を可能とするため、複数の信号ラインの遅延を揃える等長配線を導入し、プログラマブル遅延素子（オンセミ MC100EP195）を時間軸の 4 相に分割処理する工夫により、最小 80ps の時間精度を実現した。図 2.13 は、生成したパルスの始端と終端エッジ部分を独立に 80ps ステップまたは 240ps ステップでシフトさせた動作波形例である。これらは、レクロイ製ディジタルオシロスコープのパーシスタンスモードで測定し 16 種類のエッジを重ね表示したものである。更に、実際の

LDD 回路基板（図 2.14）では、トランジション周波数 f_T>4GHz を有する小型面実装トランジスタ（NEC μPA873TC）を OPU の半導体レーザの直近に最短配置し、配線インピーダンスを下げる工夫により、立ち上がり時間 Tr=700ps の高速光パルスを実現した。図 2.15 は、書き換え型相変化光ディスクに好適なマルチパルスと、追記型相変化光ディスクに好適な L-Shape パルスの光波形例である。これらの測定では、1ns 未満の立ち上がり特性を正確に捕捉するため、応答特性の優れた浜松ホトニクス製光オシロスコープを用いた。

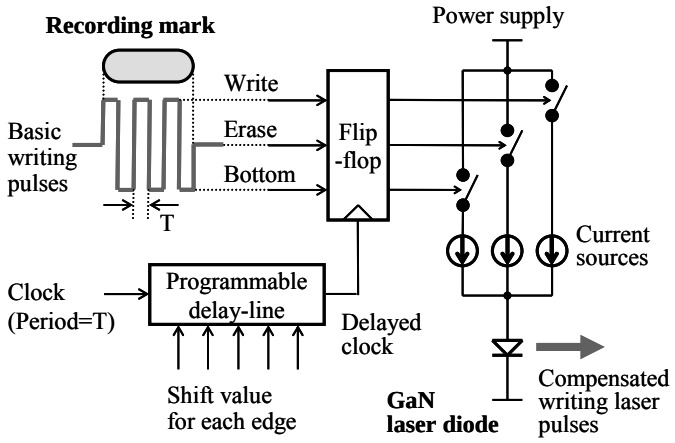


図 2.10　適応型記録補償回路（WPC）とレーザ駆動回路（LDD）の動作概念図

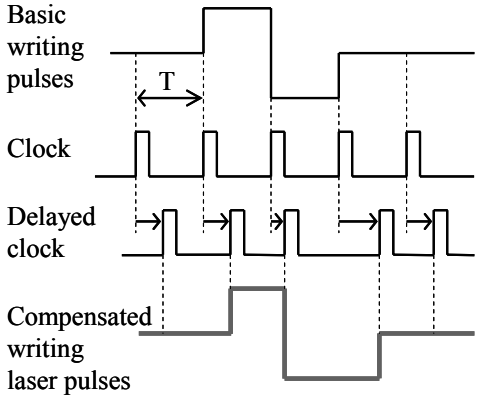


図 2.11　基本記録パルスと補償された記録レーザパルスの関係

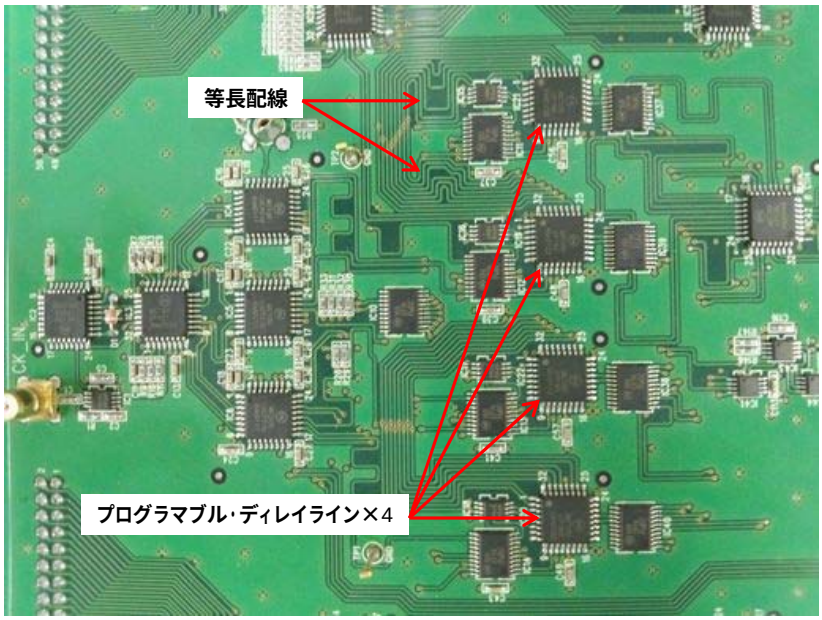
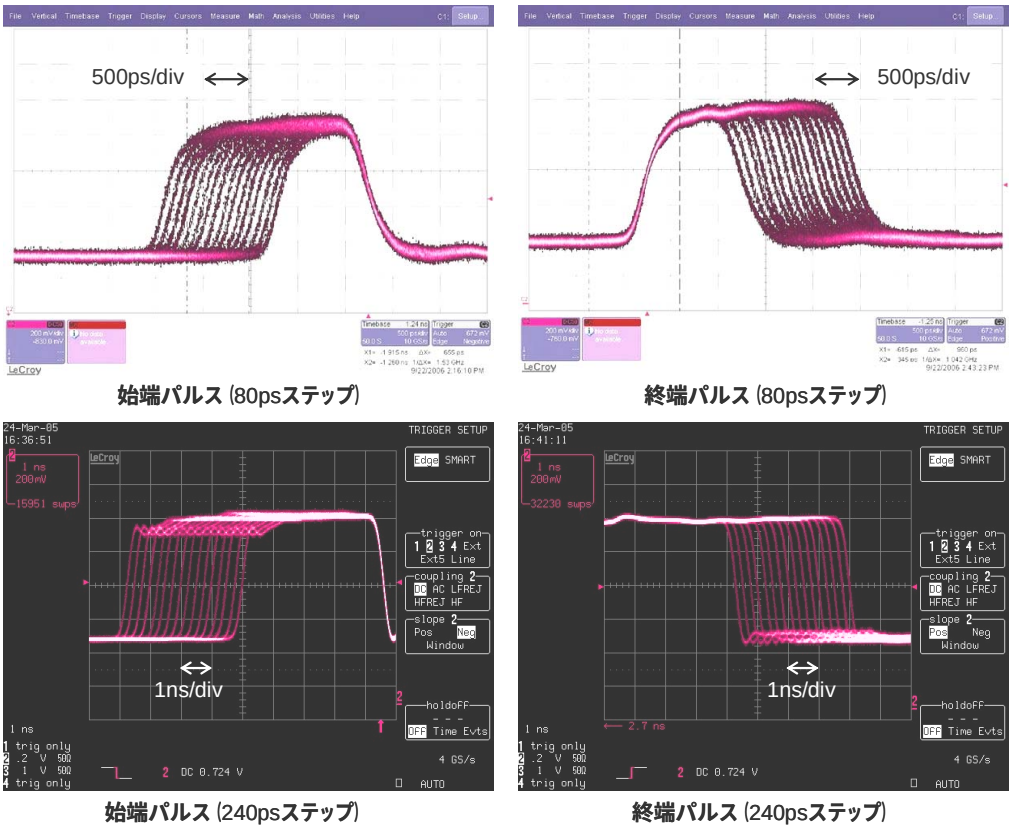


図 2.12　WPC 回路基板



始端パルス (80psステップ)　　終端パルス (80psステップ)

始端パルス (240psステップ)　　終端パルス (240psステップ)

図 2.13　適応型記録補償回路 (WPC) のエッジ制御波形

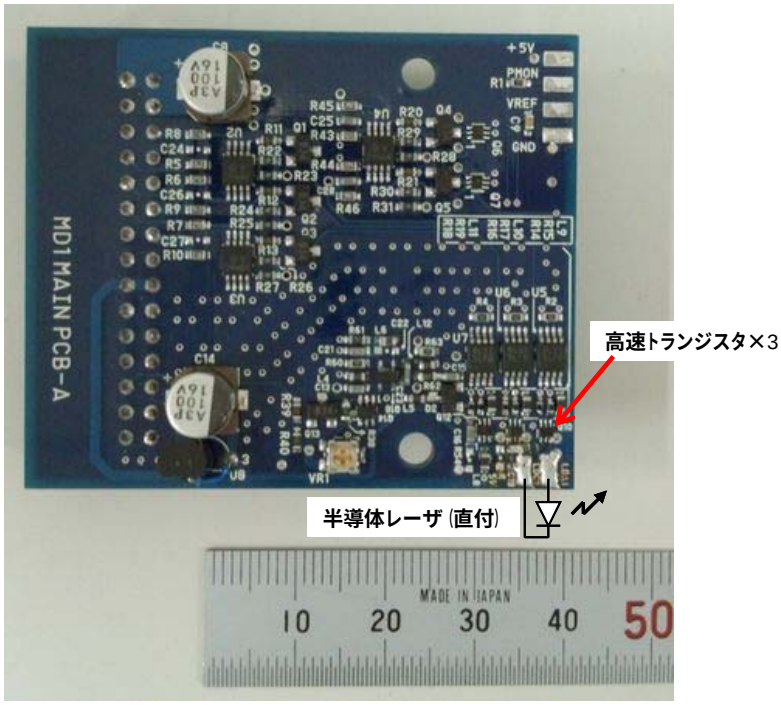


図 2.14　LDD 回路基板

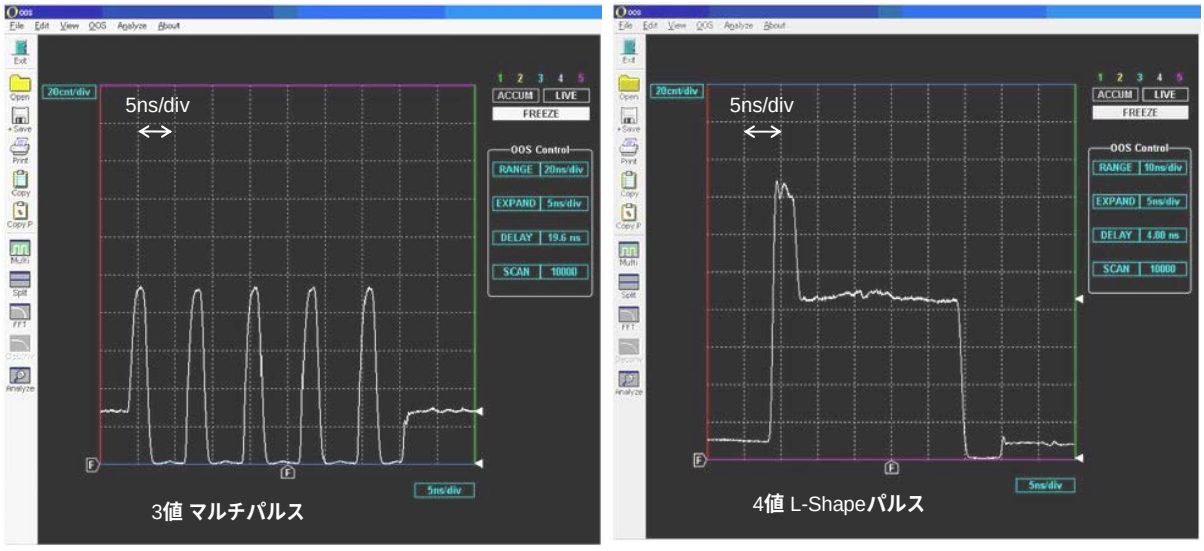


図 2.15　レーザ駆動波形 (光オシロ観察)

2.4.2　リードチャネル

図 2.9 において、リードチャネルは、ディテクタから得られた再生 RF 信号を処理して 0 と 1 のディジタル信号に戻す部分である。本研究の評価装置では、アナログリードチャネルと、ディジタルリードチャネル（ハードウエア式、およびソフトウエア式）の 3 種類を用意し、方式毎の比較が可能な環境とした。アナログリードチャネルのイコライザ（EQL：Equalizer）は、低域減衰型の周波数特性を有する光ディスクの再生 RF 信号を、高域上昇型の周波数特性で波形等化し、符号間干渉を低減させる。2 値化（BIN：Binarizer）は、波形等化された信号をデューティフィードバック法によりスライスレベルコントロールしながらコンパレータで 2 値にディジタル化する。PLL（Phase Locked Loop）は再生 2 値化信号に位相同期した再生同期クロックを生成する。また、ディジタルリードチャネルのリミットイコライザ（LEQ：Limit Equalizer）[4)]は、最短マークとそれ以上のマーク長を区別して非線形な波形等化を行う。波形等化された RF 信号はアナログオシロスコープでアイパタンとして観察する。2 値化された再生信号は、TIA でジッタ分布を測定する。一方、PRML[5)]では、再生信号を多値で判別しながら最尤復号する（PRML は第 6 章で述べる）。PRML はハードウエアによる方法と、PC にサンプルデータ取り込んでソフトウエアにより計算する方法を両用した。

実際のアナログリードチャネル回路基板（図 2.16）では、イコライザとして、ディレイラインを用いたコサインイコライザにより、直線位相の周波数特性を実現し、2 値化回路は、フィードフォワードとフィードバックを組み合わせ、過渡応答に優れたエンベ加算方式の 2 値化方法を実現した（2 値化方法は第 6 章で述べる）。更に、実際のディジタルリードチャネル回路基板（図 2.17）では、8 ビット高速 A/D（Analog to Digital）コンバータとザイリンクス製の FPGA（Field Programmable Gate Array）を使用して、LEQ や PRML の多機能を 1 枚のボード上に実装した。

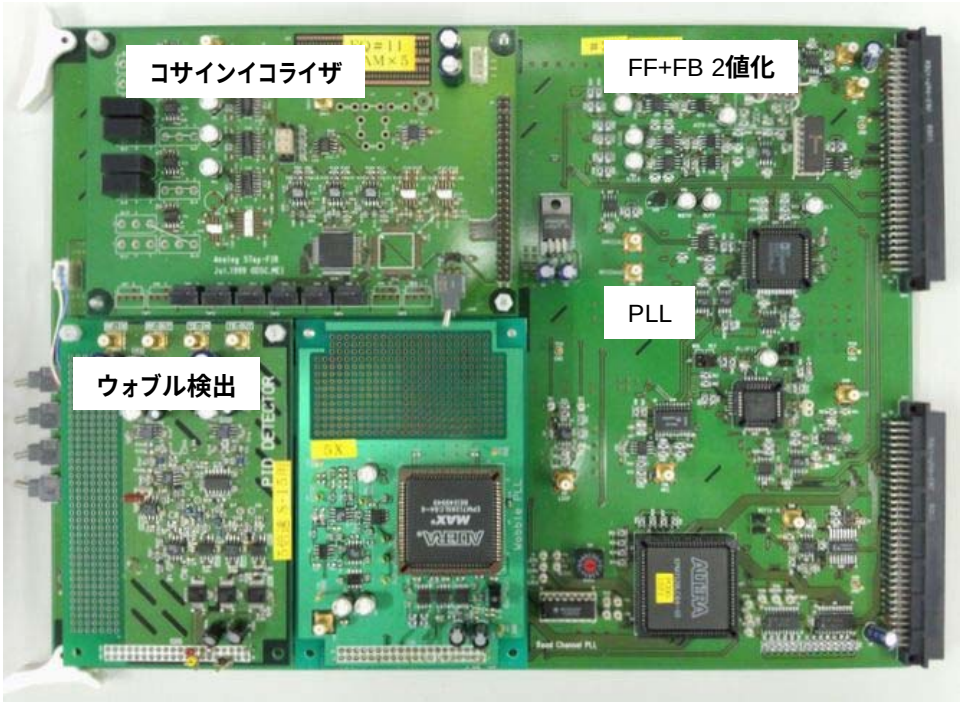


図 2.16　アナログリードチャネル回路基板

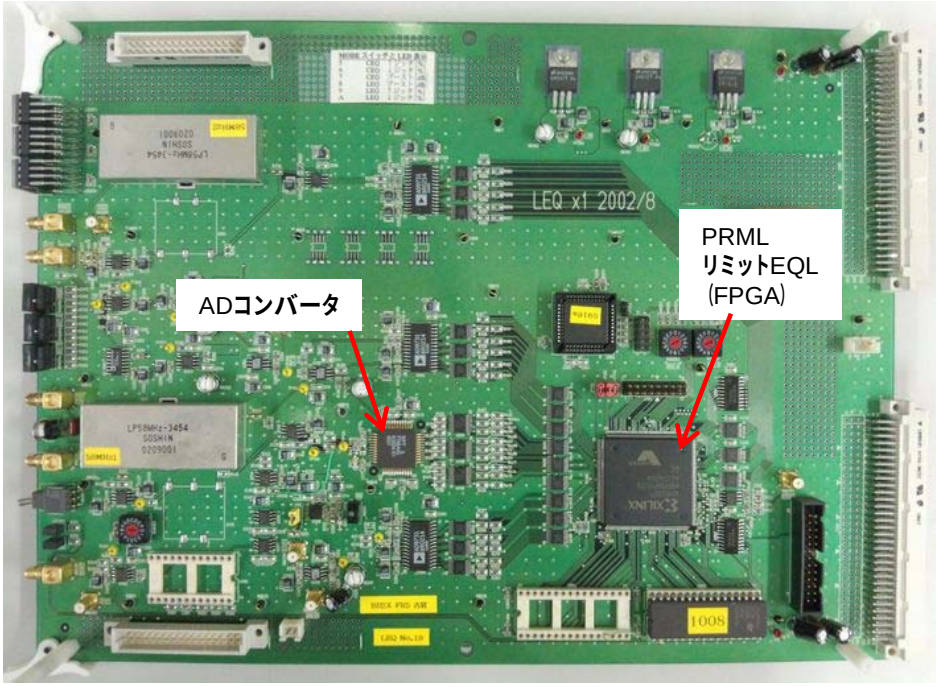


図 2.17　ディジタルリードチャネル回路基板

2.5　評価指標

光ディスクシステムのデータ記録再生の特性を最も端的に表す評価指標はビットエラーレート（bER：bit Error Rate）とジッタ（Jitter）である。本節では、bER とジッタの関係を述べ、本研究で論じる、高密度、高速度、高信頼性を定量的に検証するために導入する信号評価指標の意味を説明する。

光ディスクシステムにおける bER の値は、およそ 10^{-15} が上限の品質限界であり、10^{-18} 以下であれば実用上十分と考えられている。想定している bER を具体例で示す。例えば DVD1 枚には約 4.5GB のユーザデータが保存されており、bit 数に直すと 3.6×10^{10} である。もし bER が 10^{-15}～10^{-18} 台であったとすれば、大まかにはディスク 10 万枚～1 億枚分の総データの中に数 bit のエラーが存在する確率であり、極めてエラーが少ないことが分かる。

なお、光ディスクでは、データをそのまま記録するのではなく、エラー訂正技術 [6)]を用いている。即ち、データを元にして規則性を持たせたエラー訂正コードを冗長成分として付加してディスクに記録する。そうすれば再生時にエラーが起こった場合に、エラー訂正コードを用いて復元することが出来る。実際には、リードソロモン符号などのエラー訂正技術により、光ディスクの記録再生における bER が 10^{-3}～10^{-4} 程度あれば、エラー訂正後に 10^{-15}～10^{-18} の十分低い bER を得ることができる。即ち、光ディスクの物理レベルでは、ある程度のエラー発生を許容する実現容易な条件としながら、システムレベルでは、エラー訂正技術により極めてエラーの少ない状態を実現する信頼性の高い仕組みとなっている。

エラーは要因により 2 種類に大別される。1 つはディスクに付いた汚れや傷などのディフェクト（欠陥）に起因して突発的に発生するバーストエラーである。バーストエラーの評価は、bER を直接測定することにより評価する。bER の測定は、予め分かっている記録データと、ディスクからの再生 RF 信号をリードチャネルによって 2 値化した再生データを照合することで可能となる。もう 1 つは電子部品の電気ノイズやメディアの記録膜特性やトラック構造の不均一性に起因するランダムエラーである。ランダムエラーは、信号の揺らぎを正規分布にモデル化して統計的なエラー確率として評価できる。

光ディスクの記録再生では、図 2.18 に示すように、チャネルクロック周期 T の整数倍単位の記録データを、信号トラック上に記録マークとして形成する。このときランダムエラーの起源となる記録マークエッジの揺らぎが生じる。再生 RF 信号のエッジも同様に揺らぐ。図 2.19 のように、再生 RF 信号をオシロスコープ上に重ね合わせて表示させた波形はアイパタン（Eye-Pattern）とよばれ、信号波形の変化が整数単位なので網目状の模様となる。レベル中心位置にある開口部分がアイであり、前記揺らぎが少ないほど鮮明に開く。また、再生 RF 信号をスライスレベルで 2 値化したパルスのエッジ間隔（タイムインタバル）も揺らぐ。TIA を用いて、エッジ間隔の時間分布を表示させたグラフはジッタヒストグラムとよばれる。前記揺らぎが少ないほど分布の幅が細い。TIA では、繰り返し入力されるパルスエッジのサン

プル数 N と、エッジ間隔の平均値 $\bar{x}$と、標準偏差σを瞬時に求めることが出来る。光ディスクシステムでは、データチャネルクロックの 1 周期に相当する検出ウインドウ幅 T で正規化したσ/T [%]の値をジッタと定義する。図 2.20 に示すような正規分布を想定し、表 2.2 に示すエラー確率とジッタの関係が数学的に決まる。即ち、ジッタ値を測定することによって統計的な bER が把握できる。また、ジッタ分布の形を見れば、光ディスクの物理特性と記録原理に基づき、直感的に劣化要因の推測も可能となる。

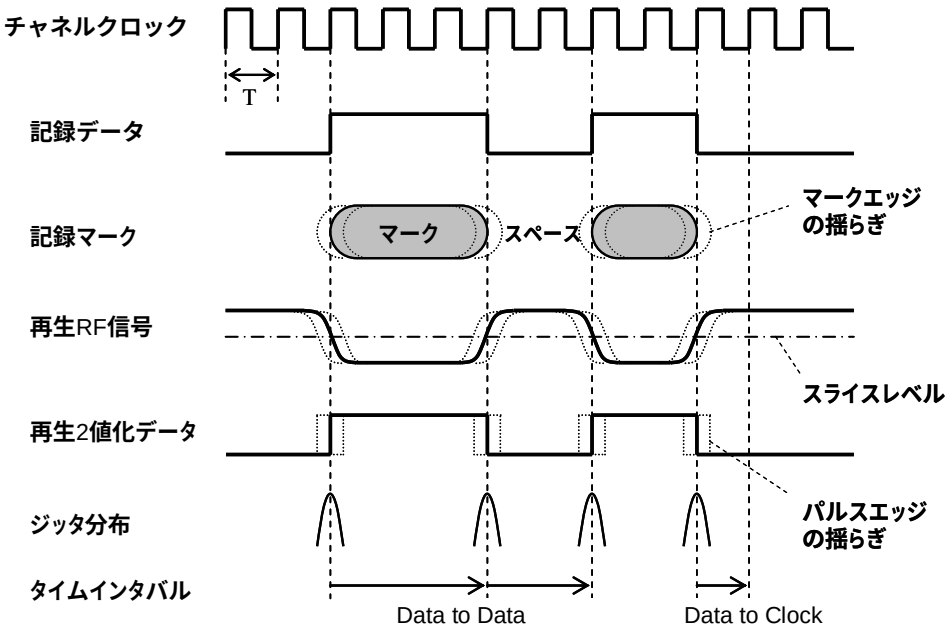
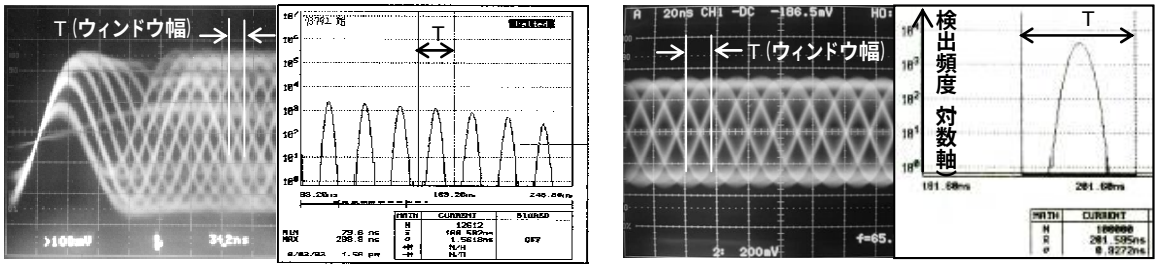
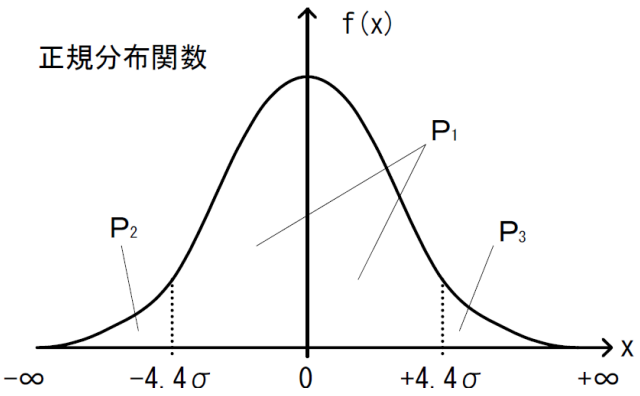


図 2.18　記録マークと再生信号のジッタの関係



自己データ基準 (Data to Data)　　**クロック基準** (Data to Clock)

図 2.19　アイパタンと TIA 測定のジッタ分布



$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2}}e^{\frac{-x^2}{2}},\quad \sigma：\text{標準偏差}$$

$$P=\int_{-\infty}^{+\infty}f(x)dx=1.0$$

$$P_1=\int_{-4.4\sigma}^{+4.4\sigma}f(x)dx=1.0-1\times10^{-5}$$

$$P_2=\int_{-\infty}^{-4.4\sigma}f(x)dx=0.5\times10^{-5}$$

$$P_3=\int_{+4.4\sigma}^{+\infty}f(x)dx=0.5\times10^{-5}$$

図 2.20　ジッタ分布とビットエラーレート P の関係

表 2.2　ビットエラーレートとジッタ (%)の関係

ビットエラーレート bER	左記エラーとなる 正規分布境界	ジッタ σ/T [%]
1×10^{-2}	±2.6σ	19.4
1×10^{-3}	±3.3σ	15.2
1×10^{-4}	±3.9σ	12.8
1×10^{-5}	±4.4σ	11.3
1×10^{-6}	±4.9σ	10.2

PRML 方式を前提とする再生システムの場合は、bit-by-bit の 2 値化ジッタと同感覚で扱え、再生信号品質に相関するエラー評価指標として、MLSE（Maximum Likelihood Sequenced Error）[7]、または、i-MLSE（Integrated - Maximum Likelihood Sequenced Error）[8]を用いる。

なお、再生信号だけでは把握できない記録マークの最終評価は、記録済みのディスクを剥がして記録膜を直接顕微鏡観察する。SEM（Scanning Electron Microscope：走査型電子顕微鏡）や TEM（Transmission Electron Microscope：透過型電子顕微鏡）は有効な手段であり、図 2.21 の様に記録されたマーク形状を観察することで記録方式と記録状態の関係を把握できる。

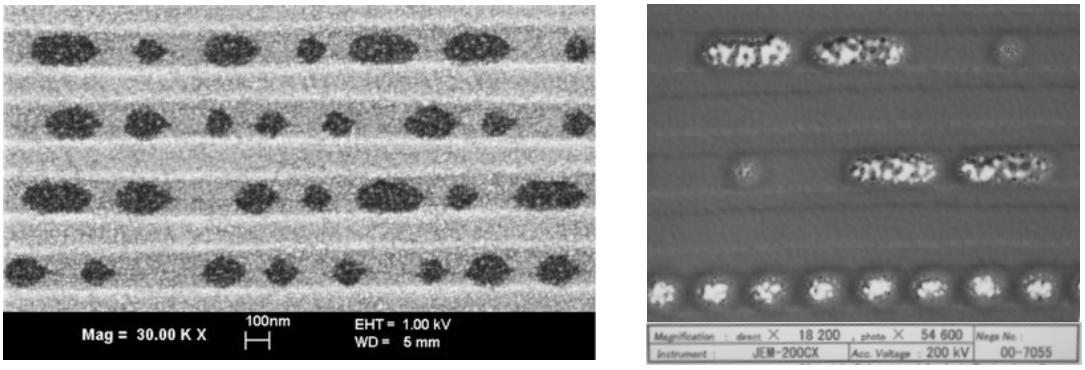


図 2.21　記録マークの SEM 像（左）、TEM 像（右）の例

2.6　まとめ

本章では、まず、相変化光ディスクシステムの記録再生の原理について述べた。記録動作は、ライトチャネルが生成する記録信号に応じて半導体レーザを駆動することでパルス光を照射し、記録膜に相変化を起こしてマークとスペースを形成する。また、再生動作は、記録膜のアモルファス相のマークと結晶相のスペースの反射率の違いを検出し、リードチャネルでディジタル信号に戻すことで達成される。

次に、前記原理に基づく相変化光ディスクシステムを実現するために必要な研究環境を構築した。メディアサンプルの作製方法を明確化し、メディアの評価と記録再生処理方式の原型開発を行うための光ディスク評価装置を独自開発した。更に、特性の評価指標として bER とジッタを導入した。これにより、メディアサンプルを試作し、それを光ディスク評価装置を用いて特性評価し、その評価結果で再びメディアおよび記録再生処理方式を改良できる。即ち、試作・評価・改良の繰り返しによって、相変化材料のポテンシャルを引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶するメディアの形態、ドライブの方式を検討する研究環境と方法を確立した。

参考文献

1) S. Abe, S. Sato, E. Ito, M. Tsukuda, M. Tomiyama, and E. Ohno: “Master Recording for High-Density Disk Using 248nm Laser Beam Recorder”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1704.
2) 岩坪正勝、新免恵三、佐野強、内田伸: “タイムインターバルアナライザ TA520”, 横河技報 **44**, No. 1 (2000) 29.
3) S. Furumiya and Y. Fujiwara: “Laser Pulse Compensation Applied to Phase-Change Recording Film to Form Nano-Sized Marks”, Journal of Physics: Conference Series **417** (2013) 012050.
4) S. Miyanabe, H. Kuribayashi, and K. Yamamoto: “New Equalizer to Improve Signal-to-Noise Ratio”, Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 1715.
5) 宮下晴旬、中村敦史、南野順一、東海林衛: “PRML を用いた記録容量 25GB 相変化光ディスクの信号処理方式について”, ITE Tech. Rep. **25**, MMS2001-49 (2001) 13.
6) 徳丸春樹、横川文彦、入江満: “図解 DVD 読本”, オーム社 (2003) 106.
7) H. Miyashita, T. Nakajima, N. Kimura, Y. Hino, and H. Ishibashi: “Signal Qualification Method for Partial-Response Maximum-Likelihood Read/Write Channel”, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) 4850.
8) J. Shiraishi, S. Kobayashi, H. Miyashita, and Y. Hino: “New Signal Quality Evaluation Method for 33.4GB/Layer BDs”, Tech. Dig. Int. Symp. Optical Memory ‘09, Tu-F-08 (2009) 74.

第3章　相変化光ディスクの物理アドレス方式の開発

3.1　はじめに

記録型の光ディスクでは、未記録の信号トラックの位置を特定するためにアドレスを設ける。ディスクを作製した時点であらかじめ物理構造的に埋め込まれているので物理アドレス（Physical Address）と言う。光ディスクドライブは、ディスク上の物理アドレスを目印にして、信号トラックの特定位置にデータを記録し、また、ランダムな検索を行いデータを再生する。物理アドレス、信号トラックの配置、書き込むデータの記録形式、および、ディスクの物理構造、寸法などの定義を総称して光ディスクの物理フォーマットという。物理フォーマットは、光ディスクメディアの最も基本的な仕様であり、光ディスクシステムの性能を決定づける極めて重要な要素である。

本章では、相変化材料の持つ特徴とポテンシャルを最大限に引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶することができる書き換え型のメディア形態、即ち、高いデータ記録密度と優れた信頼性を兼ね備えた相変化光ディスクの物理フォーマットを実現するために、光ディスクメディアの信号トラックアドレスの仕様を提案し検証する。

3.2　Land & Groove 記録に適した物理アドレス

3.2.1　Land & Groove 記録方式

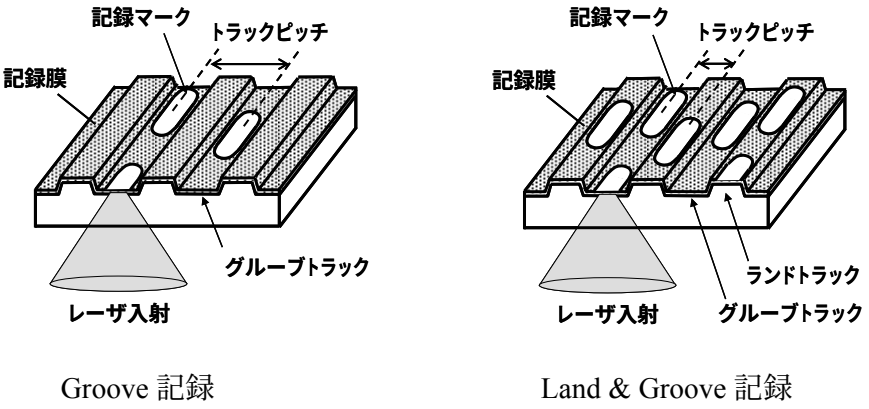
光ディスクの信号トラックの間隔、すなわちトラックピッチ（Tp：Track pitch）を詰めることによってデータの記録密度を高めることを考える。この場合、光ビームのトラッキングサーボを安定に掛けるためは、トラックピッチの縮小にも限界がある。プッシュプルトラッキング誤差信号を SNR（Signal to Noise Ratio）良く得るためには、光ビームスポット径が信号トラックの段差周期構造を十分に光学分解できなければならない。光学系のレーザ波長をλ、集光レンズの開口数を NA とすると、トラックピッチはおよそ 0.6*λ/NA 以上必要とされる。たとえば波長λ=650nm、対物レンズ NA=0.6 の光学システムを考えた場合、トラックピッチは約 0.70μm 以上必要である [1)]。信号トラックの使い方は、図 3.1 のように、案内溝の片方だけを用いるグルーブ（Groove）記録と、グルーブとランド（グルーブの間）の両方を用いるランド＆グルーブ（Land & Groove）記録の 2 方式がある。ランド&グルーブ記録を採用すれば、光学的トラックピッチはグルーブ記録の信号トラックピッチの 2 倍となるので、トラッキングサーボの点で有利である。

ただし、ランド&グルーブ記録には、記録信号品質の課題とアドレス挿入の課題があった。記録信号品質の課題は、クロストークが大きいことと、ランドとグルーブの特性差である。Miyagawa らはランドとグルーブの再生クロストークをグルーブ深さの設計手法[2)]により低減

し、また、Ohnoらはランドとグルーブの特性差を記録膜の位相差設計手法[3)]により改善した。ランド&グルーブ記録の記録信号品質の課題は、実用上問題ないレベルに解決された。

次に、アドレス挿入の課題について述べる。ランド&グルーブ記録は、信号トラックの側壁が隣接トラックと共用となるため、ランドとグルーブで独立したトラックウォブル変調を設けることが出来ない。従って、ウォブルによるアドレス挿入が困難である。そこで、信号トラックを中断してピットアドレスを挿入する方法が妥当と考えられる。この場合、図 3.2 のように、ランドとグルーブのそれぞれに対してピットアドレスを配置すると、隣のアドレスが非常に近接するので大きな再生クロストークが発生する。そこで、図 3.3 のように、ランドとグルーブのトラック中間に共用のアドレスを配置するオフセットピットアドレスが考えられた。こうすればランドとグルーブの両方から読み出すことが出来、ピットアドレス部のクロストークも少ない。しかしながら、オフセットピットアドレス方式にも実用上の問題があった。信号トラックに対してアドレスが半分しか存在しないので、もし光ビーム走査がトラック中心からずれるオフトラックが発生すると、アドレスの読み取り不良が発生しやすいことである。更に、アドレス領域を光ビームスポットが通過する際、ピットアドレスが光ビーム中心にないため、大きなトラッキング誤差信号が検出されて、トラッキング制御がずれてしまう課題があった。

従って、ランド＆グルーブの持つ高密度記録の特性を生かした書き換え型の光ディスクを実現するためには、オフセットピットアドレスが有する課題（オフトラック時の読み出し不良、トラッキング制御ずれ）を克服する新しい提案が必要である。



Groove 記録　　Land & Groove 記録

図 3.1　グルーブ記録とランド&グルーブ記録

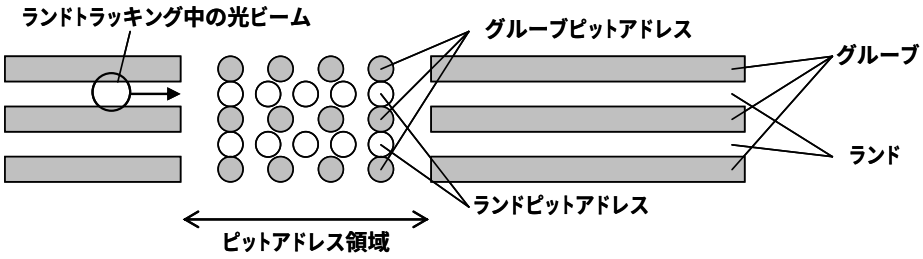


図 3.2 ランドとグルーブ両方にピットアドレスを挿入した場合

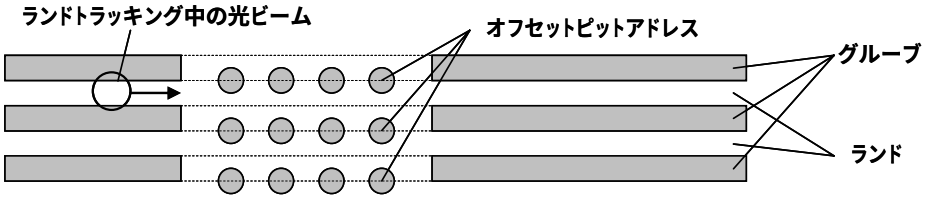


図 3.3 ランドとグルーブの中間にピットアドレスを挿入した場合

3.2.2 CAPA (Complementary Allocated Pit Address)

前述の課題を解決するために、CAPA（Complementary Allocated Pit Address：キャパ）方式を考案した [4)]。図 3.4 上に示す様に、オフセットピットで構成されるアドレス情報を 2 つのグループに分けて、アドレスグループ単位でトラック中心から半径方向に半トラックピッチ分だけ内周側と外周側に交互にオフセットさせる独自の配置とした。CAPA の検出回路を図 3.4 下に示す。CAPA は 2 分割ディテクタの和信号および差信号どちらでも検出できる。図 3.4 中の波形は、光スポットがアドレスを通過するときの和信号と差信号の検出信号を示す。光スポットが信号トラック中心を走査する場合、和信号では、2 つのアドレスグループがほぼ同じ振幅で得られることを示している。一方、差信号は、光スポットに対してピットが内周側と外周側のどちらに有るかによって極性が変化し、ランドトラックとグルーブトラックとで逆極性の信号が得られることを示している。

本提案の CAPA 方式は以下の特徴を有する。和信号で読み取る場合に、光スポットがトラック中心から内周側または外周側のどちらにオフトラックしたとしても、対になっているアドレスグループのどちらか一方が常に読める仕組みとなっている。また、差信号からプッシュプルトラッキング誤差信号が検出されるが、CAPA を光ビームスポットが通過するとき、アドレスの前半と後半で誤差信号が逆極性となるので、ピットアドレス領域通過後のトラッ

キングオフセットは相殺されて原理的に発生しない。即ち、前述のオフセットピットアドレスが有する課題は完全に克服された。

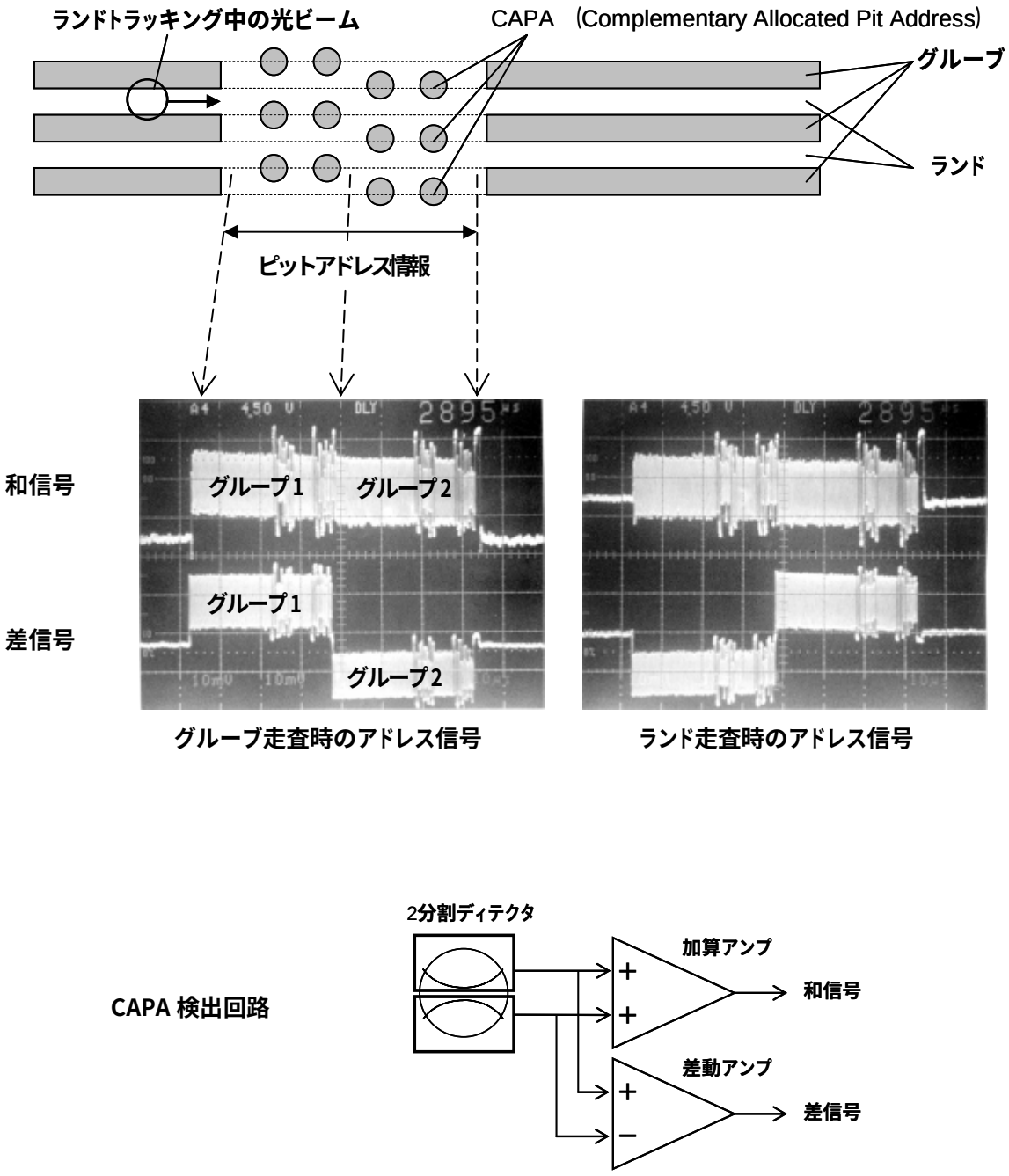


図 3.4　CAPA (Complementary Allocated Pit Address) 方式

3.2.3　単一ウォブルの併用

ランド＆グルーブ記録では、信号トラックの側壁が隣接トラックと共用されるため、グルーブにウォブル変調を設けると、ランドのトラック幅が変化してしまい、ランドの反射光量が周期的に変化する問題が発生する。しかし、ウォブルが単一周波数でかつ隣接トラック間で同相となる条件（図 3.5 上）を満たせばランドトラック幅の変動はない。そこで、CAPA の間を決まった波数の単一周波数ウォブルで連結する物理フォーマットを採用した（図 3.5 下)。波数が決まっておれば、一度 CAPA が検出されると、ウォブルをカウントすることにより、次の CAPA の位置が予測できるようになる。

ディスク全面のトラックフォーマットは、ランド＆グルーブ記録の信号トラックへ、セクタ単位で周期的に CAPA を挿入し､その間の信号トラックを単一周波数のウォブルで変調し、隣接ウォブルが同位相となる CAV（Constant Angular Velocity）方式を基本とした。その構成は、図 3.6 に示すように、半径方向に、最内周の 1 周 25 セクタの第 0 ゾーンから、最外周は 1 周 59 セクタの第 34 ゾーンまで 35 分割した。ゾーン内では CAV とするが、記録密度が半径によらずに全面でほぼ一定となるように外周ゾーンほどセクタ数を増す。トラックフォーマットの詳細構造を図 3.7 に示す。

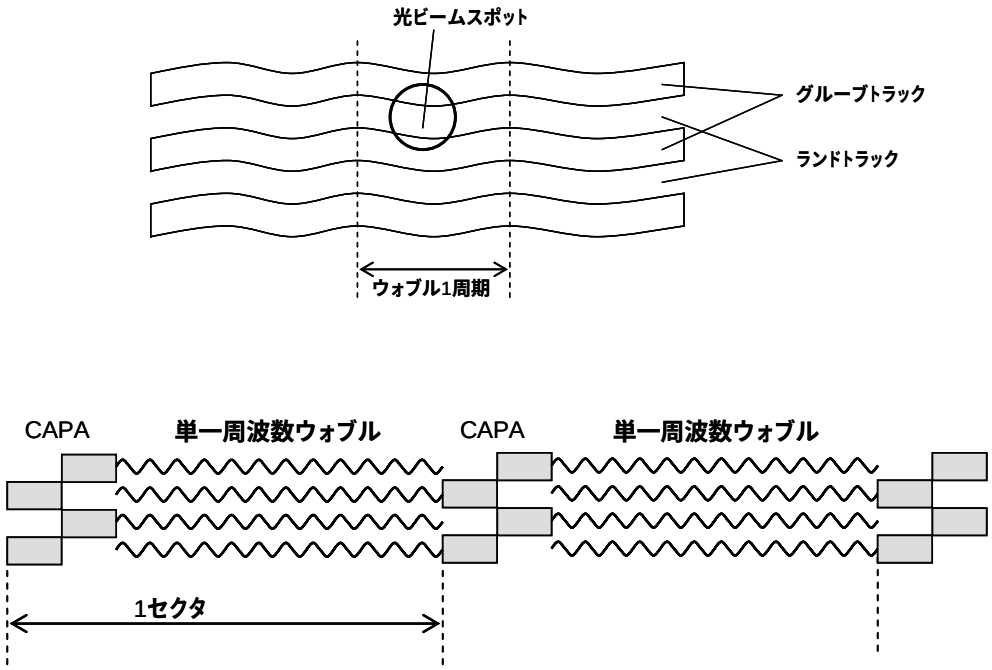
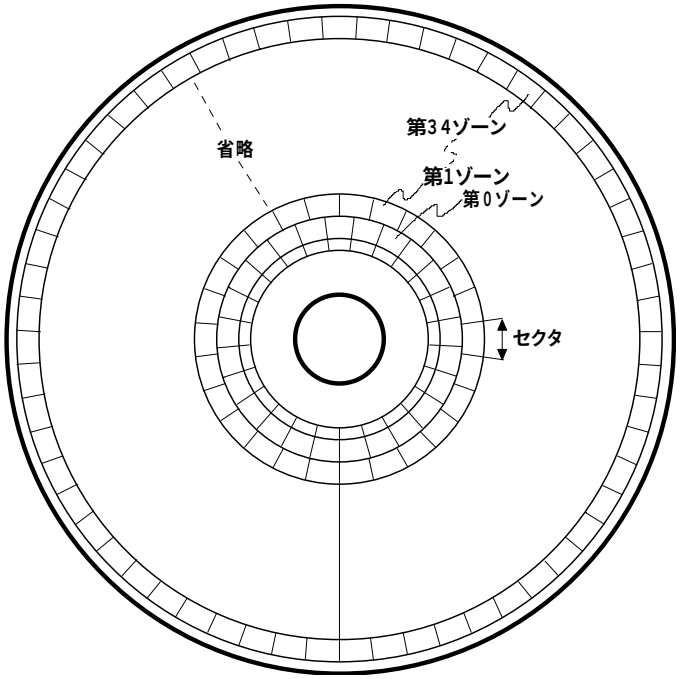


図 3.5　ランド＆グルーブの同相ウォブル

模式図



実物

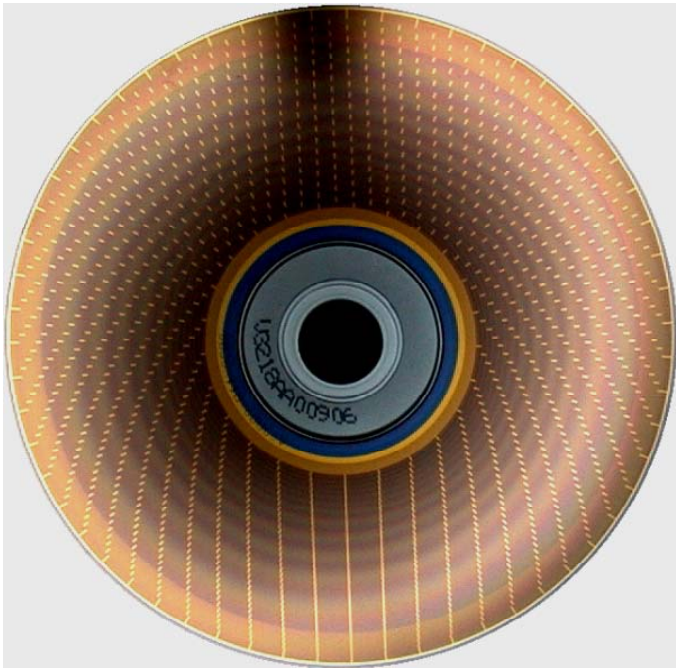


図 3.6　ゾーンフォーマット

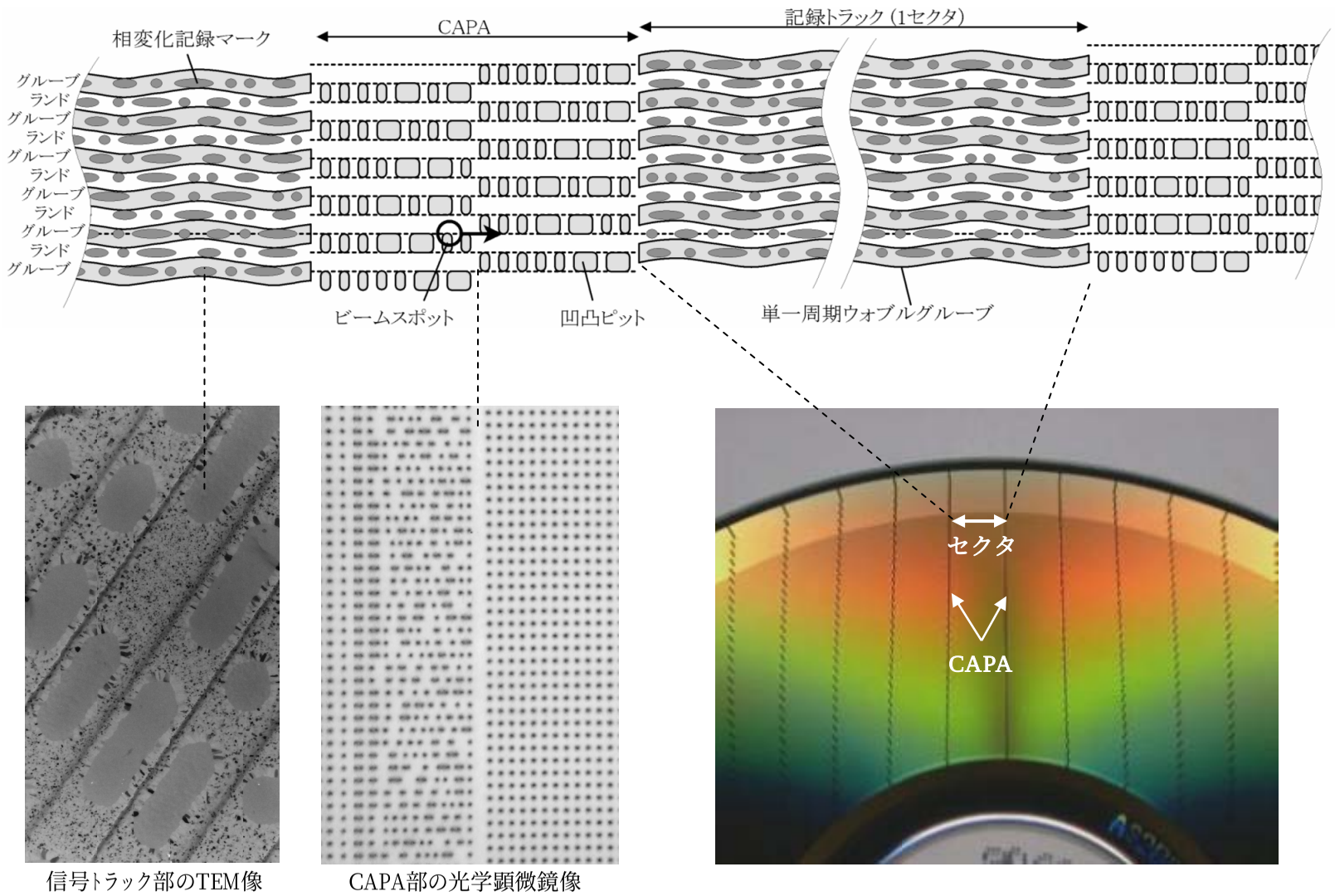


図3.7　トラックフォーマットの詳細構造

3.2.4　検出方式と検証結果

ウォブルから再生されるクロックの信頼性を設計保証するために、ウォブル信号の必要 SNR を見積もる。ウォブル信号の SNR とウォブル信号のジッタの標準偏差σ（実効値）の関係は、SNR の定義から（式 3.1）のように書ける。

$$x = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{2\pi\sigma f}\right) \qquad \text{(式3.1)}$$

但し、 x [dB] ： ウォブルのSNR
σ[s] ： 揺らぎの標準偏差
f [Hz] ： ウォブルの周波数

ここで、記録チャネルクロックを 58.4MHz、正弦波ウォブル 1 周期のクロック数を 186 とした場合、ウォブル周波数は f=314KHz となる。更に、ウォブルジッタの目標仕様を±8 クロック（±1 バイト）以内に抑える確率として 10^{-4}（＝3.896σ）とすると、式 3.1 より必要 SNR は x=14.2dB と計算される。図 3.8 に示す検出モデルで、再生時のウォブル抽出の BPF（Band Pass Filter）の帯域幅をウォブル周波数の±20%の BW（Band Width）=127KHz とすると、スペクトラムアナライザで測定可能な狭帯域の CNR（Carrier to Noise Ratio）は、RBW（Resolution Band Width）=10KHz の条件で 25.2dB と分かる。

次に、光ディスクとして実使用中の CNR 劣化を想定する。隣接トラックに記録された記録データからのクロストークにより、走査トラックのウォブル信号のノイズが上昇する。再生ビームスポットのラジアルチルト±0.7 度、オフトラック±0.031μm を想定した時のクロストーク劣化量は、予備実験から最大-6dB と把握した。また、走査トラック自身に最大 10^5 回の繰り返しデータオーバライトを想定した時のウォブルノイズ劣化量を、実験から最大-3dB と把握した。従って、実使用における必要 CNR は、25.2+6+3＝34.2dB と見積もられる。

以上の見積もりについて、レーザ波長λ=650nm、対物レンズ NA=0.60、線速度 8.2m/s の実再生システムで、トラックピッチ 0.615μm、溝深さλ/6、ウォブル振り幅±20nm、相変化記録膜のランド＆グルーブメディアを試作してウォブル CNR を再生評価した。結果は、図 3.9 左の通り、5 トラック記録のセンタートラックの条件で CNR＝41.6dB（@RBW=10KHz、グルーブ）を得た。必要 CNR の 34.2dB を十分上回る特性が得られている。更に、図 3.9 右のようにラジアルチルト±0.7 度、オフトラック±0.031μm を与えた場合でも、クロストーク劣化-6dB を想定した値 28.2dB に対して十分なマージンが得られた。以上の必要 CNR の見積もりと実測評価から、ウォブルから再生されるクロックの品質とウォブルカウントによる CAPA アドレスの位置検出について高い信頼性が期待できる。

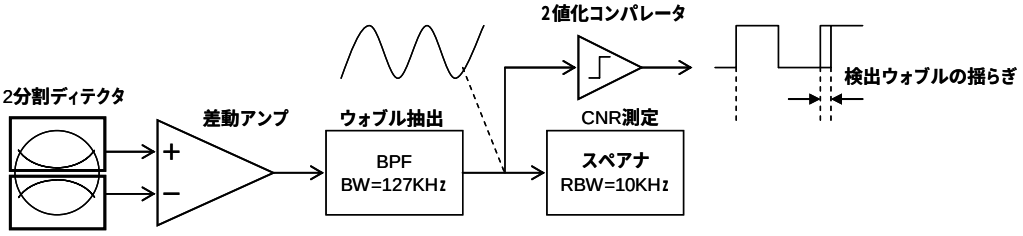
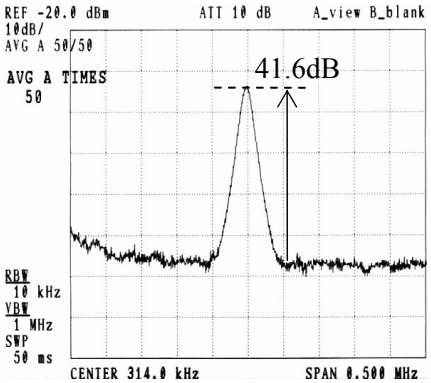


図 3.8　ウォブル検出モデル



ウォブルCNR[dB]　@5トラック記録のセンタートラック

LAND		オフトラック[μm]				
		0.031	0.022	0	-0.022	-0.031
Rチルト[deg]	0.70	37.7	39.3	41.9	38.6	36.7
	0.36	38.9	41.2	41.7	38.5	36.2
	0	39.5	40.7	41.3	37.1	36.0
	-0.36	39.6	40.9	40.2	36.7	34.7
	-0.70	40.7	41.2	30.0	35.4	33.3
GROOVE		オフトラック[μm]				
		0.031	0.022	0	-0.022	-0.031
Rチルト[deg]	0.70	36.6	38.9	42.0	35.6	33.9
	0.36	39.7	41.7	42.7	37.4	34.8
	0	41.7	44.1	41.6	36.2	35.2
	-0.36	43.4	44.0	39.7	35.4	33.8
	-0.70	42.9	43.3	37.9	33.1	31.9

図 3.9　ウォブル CNR の実測

次に、CAPA に格納されたアドレスデータの検出性能を検証した。記録線密度 0.28μm/bit の CAPA を設けたトラックピッチ 0.615μm のランド＆グルーブディスクを試作した。線速度 8.2m/s となるよう回転させ、波長 650nm、NA=0.60 の光ピックアップで読み取る。再生された CAPA 信号は、図 3.10 に示す検出信号処理 [5]で、DC レベルを揃えるオフセット制御の後、AGC（Automatic Gain Controller：自動振幅制御回路）と EQL（イコライザ）を通して、A/D 変換器に入力され、多ビットのディジタル処理により 2 値化した。

図 3.11 に示す様に、グルーブトラッキングの状態で、光ビームスポットが、グルーブトラックセンターを走査する場合、トラックセンターから外周側にオフセットした場合、内周側にオフセットした場合の 3 種類について、CAPA 再生信号波形と、CAPA に含まれるエラー検出コードによる再生可否を評価した。図 3.11 において、上から＋側オフトラック 0.057μm、オフトラック±0μm、－側オフトラック 0.057μm の場合を示し、各左上波形はアドレスの和信号、左下図はトラッキング状態の模式図、右の図はディスク 1 周の CAPA の検出結果を表す。検出結果の波形において、横軸はディスク 1 周分の時間、上から CAPA に含まれる 4 つの情報 ID1,ID2,ID3,ID4 の読み出し状態、縦軸はアドレス OK 信号を表している。

結果は、オフトラック±0μm の時は、ID1～ID4 全てがディスク 1 周に渡ってエラー無く読めた。一方、＋側オフトラック 0.057μm の時は、光ビームが近づく ID3,ID4 では和信号の振幅が増加しエラー無く読めているが、光ビームが遠のく ID1, ID2 では和信号の振幅が低下しエラーが発生した。－側オフトラック 0.057μm の時は、その逆の挙動が確認された。即ち、アドレス信号を読み取る場合に、光スポットがトラック中心から内周側または外周側のどちらにトラックオフセットしても、対になっているどちらか一方が常に読めるという想定通りの結果が得られた。トラッキングオフセットは、光ディスクシステムがシーク動作（記録データを探すために、ディスク上の信号トラックをジャンピングしながら移動を続ける動作）を行う際に、過渡的に高頻度で起こる現象である。従って、本提案の CAPA は、シーク中のトラッキングオフセットに対してもアドレスの検出率が低下することなく高い信頼性を有することが実証された。

なお、本提案の CAPA 方式は、DVD-RAM メディアの物理フォーマットとして、1997 年に容量 2.6GB の Ver.1 に規格採用され、1999 年には容量を 4.7GB に拡大した Ver.2 にも継承された [6)]。2000 年以降、多くのメーカから DVD レコーダや PC データディスクとして実用化された。

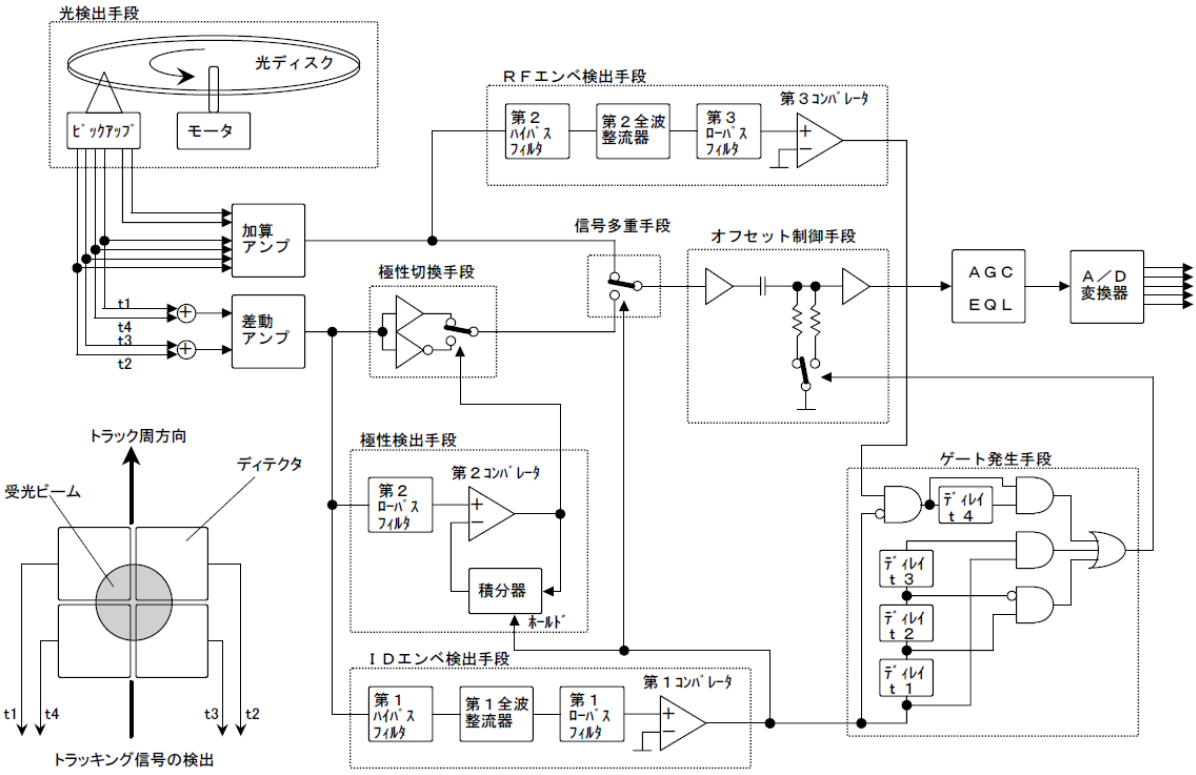
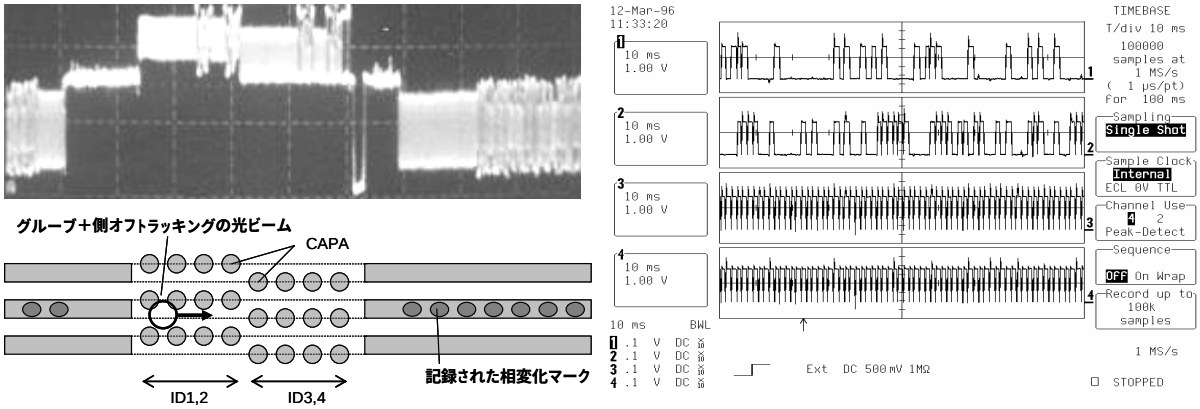
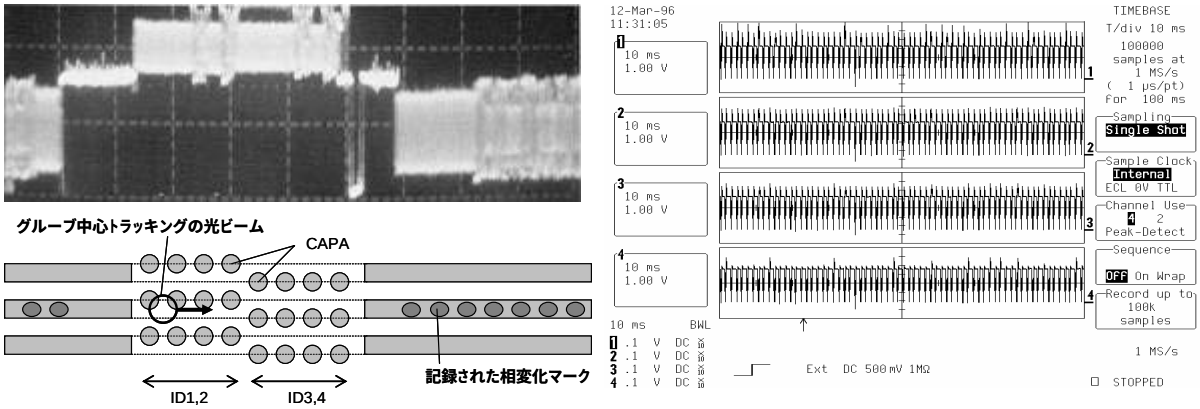


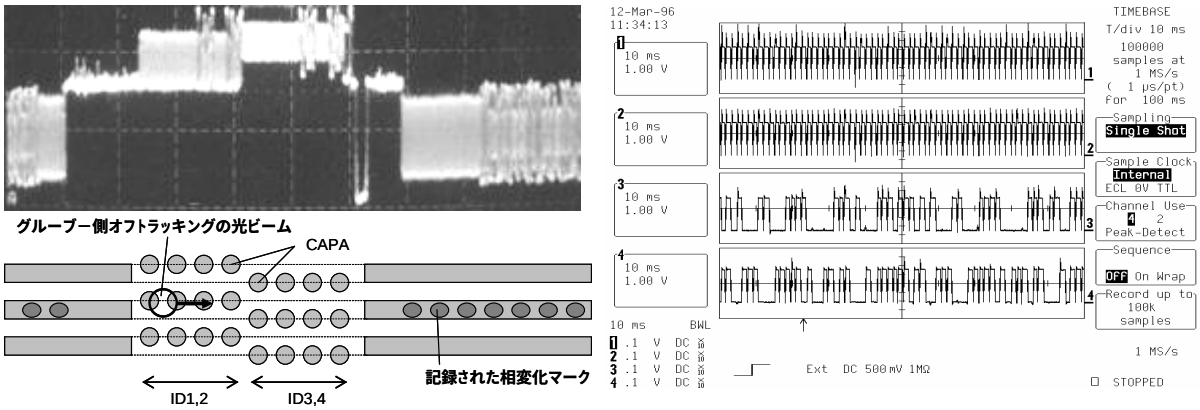
図 3.10　CAPA の検出信号処理



オフトラック＋0.057um　　検出和信号(上)、模式図(下)、ディスク 1 周のアドレス OK 信号(右)



オフトラック±0um　　検出和信号(上)、模式図(下)、ディスク 1 周のアドレス OK 信号(右)



オフトラック－0.057um　　検出和信号(上)、模式図(下)、ディスク 1 周のアドレス OK 信号(右)

図 3.11　オフトラッキング有無での CAPA 検出

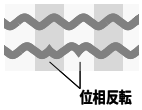
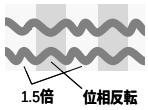
3.3　多層 Groove 記録に適した物理アドレス

3.3.1　ウォブルアドレス方式

これまで、複数の記録型の光ディスクフォーマットが提案され実用化されてきた。表 3.3 に一覧表として示し、各フォーマットのアドレス方式の優れた点と課題を整理する。CD-R/RW は、グルーブウォブルの FM 変調によりタイムコード記録を目的とした ATIP（Absolute Time In Pre-groove）アドレス [7)]を採用している。単位トラック長に格納できる情報量の少なさとトラック上の正確な位置決めが課題である。DVD-RAM の CAPA については前節で述べた。DVD-R/RW は、グルーブ間にピットを配置したランドプリピット（LPP：Land Pre Pit）方式 [8)]を採用している。グルーブウォブル自体には情報変調は行わず、クロック同期を取るための単一周波数のウォブルを採用している。LPP は局所ピットに情報を記憶する方式なので検出位置精度は良好であるが、ピットの両隣のグルーブに記録されるデータにノイズを与えてしまう課題があった。従って、記録データの同期信号部分など、限られた位置だけへの挿入が許され、LPP の頻度を多くできないという制約がある。DVD+R/RW[9)]は、大半のウォブルを正弦波として、一部分で正弦波を位相反転させる方式の高周波ウォブルである。位相反転部分の位置検出精度は高いが、ウォブルの周波数が高いのでユーザデータの記録後にデータの高周波成分が混入する場合があり、記録後のアドレスの信頼性が低下しやすい。またディスク原盤を作成するカッティングマシンの EO ディフレクタに高い応答性が要求される難しさがある。以上は 2001 年までに実用化されたアドレスフォーマットである。

また、2001 年の国際会議 Optical Data Strage 2001 にて、ソニーとフィリップスから次世代記録型光ディスクフォーマットとして DVR-blue（Disc Video Recorder by Blue Laser）が提案され [10,11)]、グルーブウォブルに MSK（Minimum Shift Keying）方式のアドレスを適用した。MSK は DVD+R/RW の高周波ウォブル方式を改良したもので、ウォブルの位相変調方法として、急峻な位相反転の接続部分がなく、1.5 倍周波数の正弦波を仲介してなめらかに接続した。これにより前述の DVD+R/RW の課題を克服しつつ、高い SNR と正確な位置決め精度を実現した。しかし、ディフェクトや検出時の同期外れ（ウォブルシフト）に弱い課題を有していた。一方、著者らパナソニックからも同会議において、次世代記録型光ディスク用の新しいアドレス方式として STW（Saw Tooth Wobble）を提案した [12)]。

表 3.3　記録型の光ディスクフォーマット一覧

フォーマット	CD-R/RW	DVD-RAM	DVD-R/RW	DVD+R/RW	Sony DVR-blue	Panasonic 25GB
アドレス方式	FM変調	CAPA	LPP	位相反転	MSK	STW
形状模式図						
トラック	グルーブ ウォブル	ランド&グルーブ 単一ウォブル	グルーブ 単一ウォブル	グルーブ ウォブル	グルーブ ウォブル	グルーブ ウォブル
パラメータ チャネルクロック ウォブル周期 ウォブル周波数 線速度	 4.23MHz 192T 22.05KHz 1.2m/s	 58.4MHz 186T 314KHz 8.2m/s	 26.16MHz 186T 141KHz 3.49m/s	 26.16MHz 32T 817KHz 3.49m/s	 66MHz 69T 957KHz 5.2m/s	 73.9MHz 155T 478KHz 4.6m/s
優れた点	単純	記録劣化なし オフトラック	位置精度	位置精度	検出SNR 位置精度	ディフェクト ウォブルシフト クロック再生
課題	情報量 位置精度	多層への適合	データへの影響	マスタリング 記録後RF混入	ウォブルシフト ディフェクト	位置精度

3.3.2　STW (Saw Tooth Wobble)

青色レーザを用いた次世代相変化書き換え型光ディスクのアドレス方式の開発では、容量 20GB を超える超高密度記録した記録層を更に多層化することを想定して、層間干渉の少なさ、ノイズやディフェクトなどの外乱に対する耐性を最優先の要件として取り組んだ。一般に CAPA 等のピット方式は、録再データ領域とアドレス領域が完全分離されているため、記録中や記録後においても非常に高い信頼性が得られる優れた方式である。しかし、ピット方式では、多層ディスクの手前層のアドレスピットの有無がレーザビームの透過率を変え、それが奥層の録再性能に影響する層間クロストークが少なからず存在することがわかったので、原理的にその影響を全く受けない連続溝ウォブル方式に候補を絞った。

また、相変化記録膜に微細な高密度マークを精度良く書き込むために、ドライブ装置でより安定で正確なクロック再生が必要である。そのため、ウォブルの主たる周波数成分が単一で、かつ、溝がスムーズに連続する構成が望ましい。単一周波数であればフィルタで抽出した基本波成分から容易に安定なクロックを生成することが出来るからである。

上記要求を満たすアドレス方式として、本研究では、単一周波数のウォブルをベースに、アドレス情報を付加するために高調波成分を重畳する新しい変調方式として、STW（Saw Tooth Wobble）を考案した。図 3.12 に示すように、信号トラックのウォブルの形状はサイン波ではなく、鋸歯のように緩い傾きと急峻な傾きの両方を備えている。ディスク外周側へ急峻に立ち上がり、ディスク中心側へ緩い傾斜で立ち下がる形状を持ったパタン 0 の波形と、逆に、緩い傾斜で立ち上がって急峻に立ち下がる形状を持ったパタン 1 の 2 種類がある。この 2 種類の鋸歯の方向に対してデータ 0 と 1 を割り当て、更に複数ウォブルの繰り返しで 1 ビットを表現することを特徴とする。

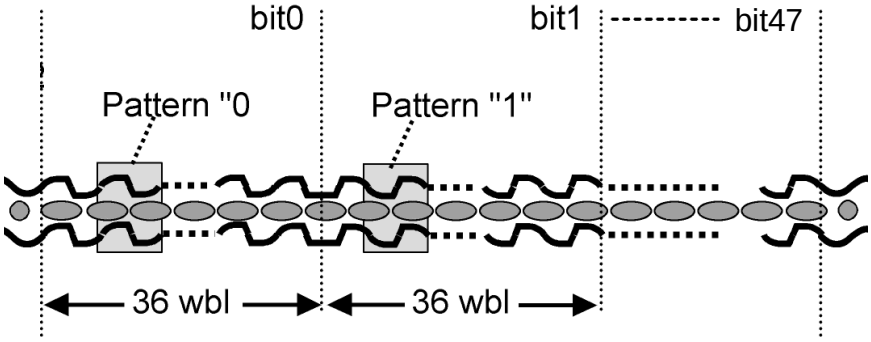


図 3.12　STW (Saw Tooth Wobble) のトラック形状とビット構成

提案した STW の基本的なフィジビリティを確認するために、トラックピッチ 0.32μm、溝深さ λ/12、ウォブル変調振幅±20nm、ウォブル周期 10μm、1 ビット当たり STW 繰り返し 36 回の条件で 2 層相変化光ディスクを試作し、線速度 4.5m/s でウォブル再生信号を観察した。図 3.13 は用いた STW 検出器を示す。ラジアルプッシュプル信号から、BPF1 によって STW の急峻な傾斜に対応する微分パルスを検出し、基本波周波数の BPF2 によりクロック主成分を抽出した。図 3.14 は得られた再生波形である。(a)と(b)の様に観察されたアドレスパタン 0 とパタン 1 は、微分パルスの極性により容易に区別できた。基本波からバンドパス抽出したクロック信号はパタンによらず一定のサイン波となった。更に、2 層ディスクの Layer0 と Layer1 の両方から良好な品質でデータ 0 と 1 をデコードすることができた。

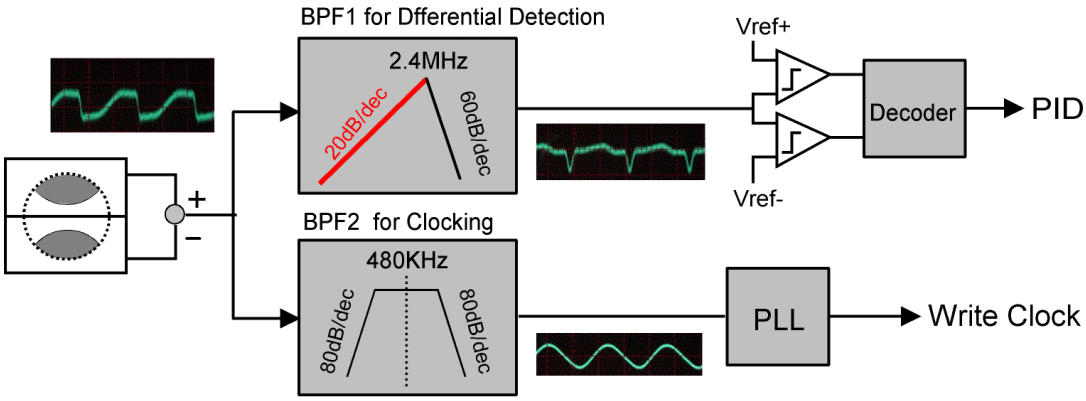


図 3.13　STW の検出器

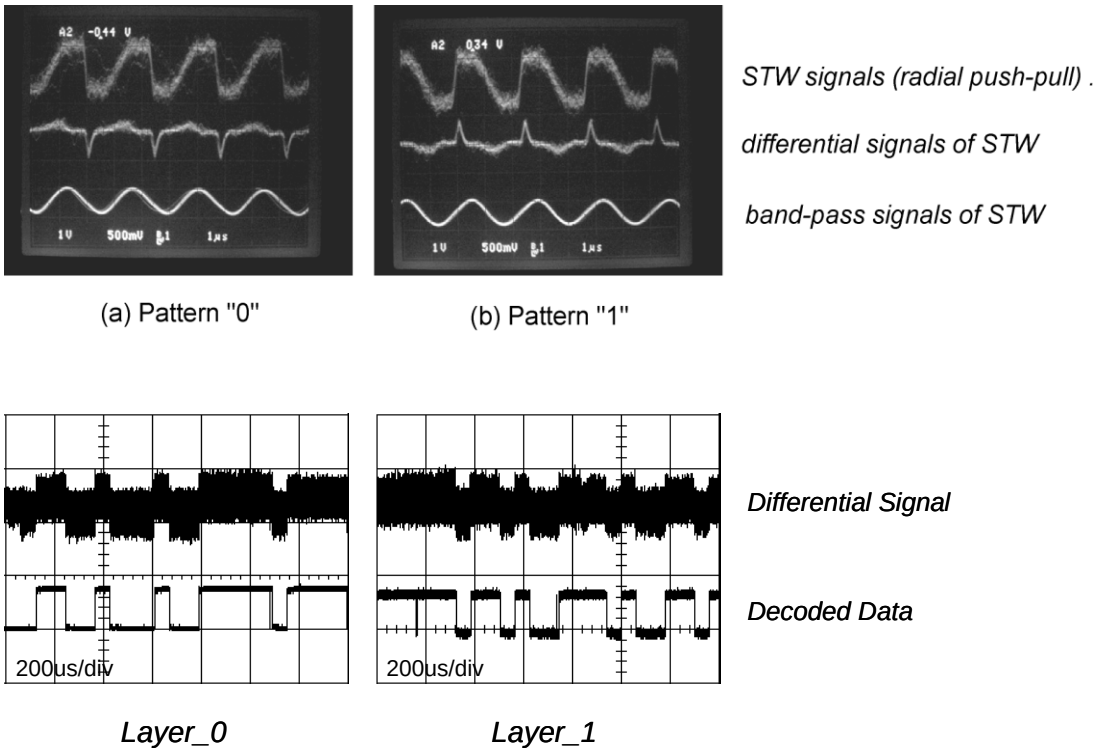


図 3.14　STW の再生信号

次に、アドレス検出のエラーレート計算から、STW に必要な SNR と繰り返し回数を見積もった [13,14]。図 3.15 に示す STW の検出エラー発生モデルにおいて、BPF1 通過後の微分パルス波形にガウシアンノイズを加算し、スライスレベル（判定レベル）に達しない確率を検出

エラーレート STW ERR とする。STW ERR は式 3.2 で示される。ここで、式中の SNR は BPF1 通過後の SNR であり、CNR(10KHz)=SNR+29dB の関係となる。さらに、STW を 36 回繰り返して 1bit の ID（identification）とし、2 値化エッジ 36 個中 19 個以上が識別された情報を真とする多数決判定を行うとすると、ID のビットエラー率 ID bit ERR（ERR：ERror Rate）は式 3.3 で示される。物理アドレス PID（Physical IDentification）を 48bit で構成する場合の PID エラーレート PID ERR は、式 3.4 となり、更に 4 個の PID 中の 3 個がエラーとなるブロックエラーレート Block ERR は式 3.5 となる。式 3.2～3.5 をプロットすると図 3.16 左のグラフとなる。CNR が高いほど多数決判定によってエラー率が飛躍的に低減するが、CNR の低下に伴い多数決効果も減少する。STW を 36 回繰り返した場合のビットエラー率の条件として ID bit ERR＜10^{-3} を考えた場合、CNR>30dB が必要で、この時アドレスの Block ERR として 10^{-4} 以下が確保できることが分かった。

更に、図 3.16 右のグラフは、STW の繰り返し回数に対する PID エラーレートの依存性である。36 回以上の繰り返しがあればより低い CNR で同じエラーレートが得られるが、逆に回数が少ないと所要 CNR が高くなっている。即ち、CNR＞30dB の条件で必要十分なアドレスエラーレートが得るためには、36 回以上の STW 繰り返しが必要なことを示している。

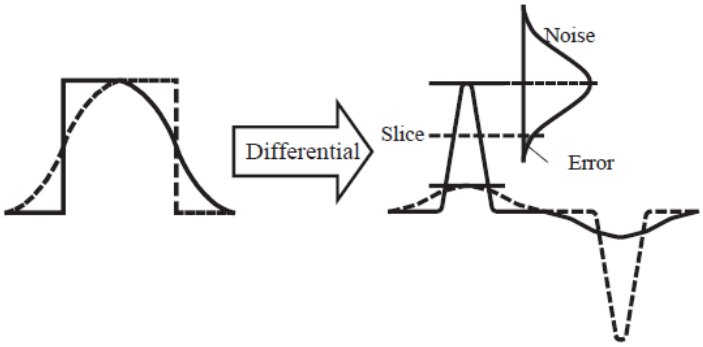


図 3.15　STW の検出エラー発生モデル

STW ERR

$$P_{STW} = 1 - \left(1 - \int_{10^{\frac{SNR}{20}}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx \right)^2 \qquad \text{(式 3.2)}$$

ID bit ERR

$$P_{bit} = \sum_{n=18}^{36} {}_{36}C_n \cdot P_{STW}^n \cdot (1 - P_{STW})^{36-n} \qquad \text{(式 3.3)}$$

PID ERR

$$P_{PID} = 1 - (1 - P_{bit})^{48} \qquad \text{(式 3.4)}$$

Block ERR

$$P_{Block} = P_{PID}^4 + 4 \cdot P_{PID}^3 \cdot (1 - P_{PID}) \qquad \text{(式 3.5)}$$

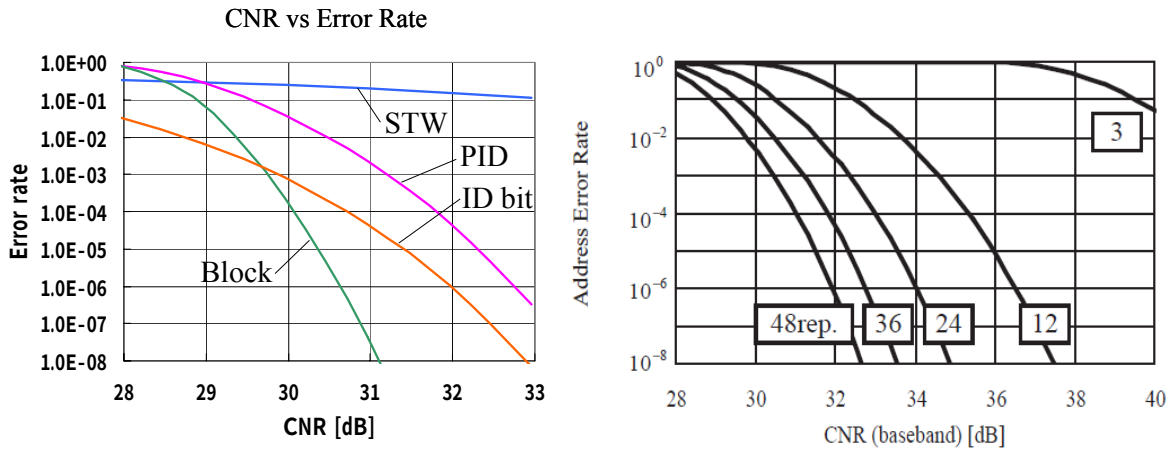


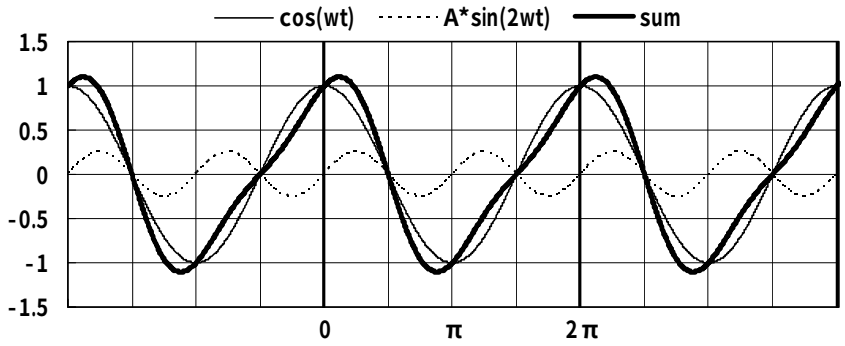
図 3.16　ウォブル CNR とアドレスエラーレートのウォブル繰り返し回数依存性

Saw Tooth Wobble の数学的記述

STW は三角関数を用いて定義できる。式 3.6 の様に、ウォブル周期の基本波 cos(ωt)と、振幅 0.25 の 2 次高調波 sin(2ωt)の加算で表され、高調波成分の極性 A がデータ 0 と 1 の場合で反転している。加算する高調波成分の振幅 A が大きいほどデータ成分の SNR が大きくなり再生の信頼性が増すが、波形の歪みが大きくなる。STW から得られるアドレステータの信頼性を高めるために A の値は大きいほどよいが、ウォブル波形歪の許容度から-12dB 以下が望ましい事を考慮して、2 次高調波成分の振幅として A=0.25(-12dB)を決定した。図 3.17 にその波形を示す。その大きな特徴は、STW のゼロクロス点が、たとえデータが 0 と 1 に変化しても、変調していないモノトーンウォブルと同じであることである。なお、STW に 4 次以上の偶数高調波成分を含めることで、よりシャープな鋸歯を表現できるが 2 次成分だけに制限した。これにより、ディスク作製時は、カッティング装置の EO ディフレクタの必要帯域を低く抑え、ディスク再生時は、他からのノイズによるウォブル高周波成分の劣化を防ぐことを狙った。

$$STW = \cos(\omega t) + A \cdot \sin(2\omega t), \quad A = \pm 0.25 \qquad \text{(式 3.6)}$$

データ 1
（A=+0.25）



データ 0
（A=-0.25）

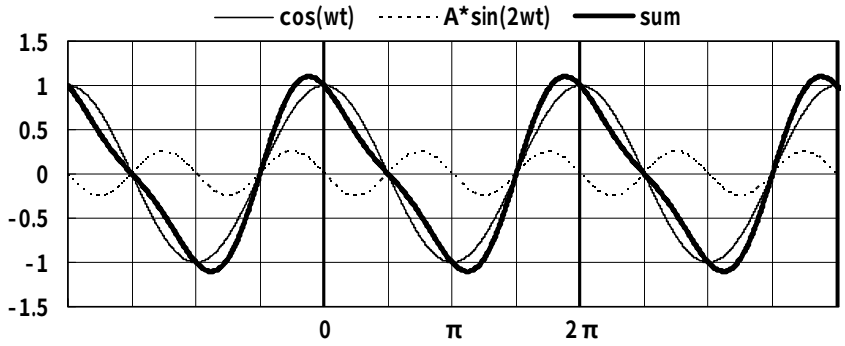


図 3.17　STW の波形

3.3.3　MSK (Minimum Shift Keying)マークの併用

次世代相変化書き換え型光ディスクのアドレス方式の設計コンセプトは、光ディスク固有の様々なタイプの歪みに対して強固な方式を実現することである。光ディスクで発生する歪みを大別すると次の４つとなる。

①ノイズ：トラッキング溝の形成の粗さや記録膜から生じる溝ノイズ、記録したデータから漏れてくるデータクロストークノイズ。

②ウォブルシフト：ドライブ装置でのウォブル位置検出が本来の正規位置より相対的にずれてしまい検出感度が下がる現象。シーク直後などに過渡的に発生しやすい。

③ウォブルビート：隣接トラックからのウォブルクロストークで発生する。CLV（Constant Liner Velocity）フォーマットにおける隣接ウォブルの角周波数ずれに起因する。

④ディフェクト：ディスク表面のゴミや傷による局所欠陥。

これら異なるタイプの歪み全てに対応可能なアドレス方式を、一つだけの手段で実現することは事実上困難である。先に提案した STW は、繰り返し挿入により高いディフェクト耐性、ゼロクロス位置を保つクロック再生の連続安定性、ノイズに対する広い検出マージンを有するが、検出位置精度に関しては能力が低い。一方、STW と相補的な特徴を持つ MSK は、高い SNR と正確な位置決め精度を有するが、ディフェクトや検出時の同期外れ（ウォブルシ

フト）に弱い課題を有していた。表 3.4 に STW と MSK の特徴比較を示す。従って、STW と MSK と併用するアドレスフォーマットを実現すれば､MSK のビット検出能力と STW の読み出し耐性を両立させ、双方のデメリットを補完できると考えた [15,16]。

表 3.4 STW と MSK の比較

特性評価項目	STW	MSK
検出SNR	○	◎
検出位置精度	△	◎
耐ウォブルシフト	◎	△
耐ディフェクト	◎	○

上記考えに基づく新しい物理アドレス方式を提案する。ADIP Uint（ADIP：ADdress In Pre-groove）と呼ぶアドレス 1 ビットを構成する単位から説明する。図 3.18 に示す ADIP Unit は、アドレス 1 ビットを 56 ウォブルから構成し、各 1 ウォブルはチャネルクロックの 69 個分からなる。ウォブルは cos(ωt)のモノトーンを基本とするが、先頭 3 ウォブル部分にビットシンク（1 ビット毎の同期信号）として、MSK が配置され、ウォブル番号 12～16 には位置の違いで情報を持つ MSK、ウォブル番号 18～54 には傾斜の違いで情報を持つ 37 個の STW で構成する。MSK は、真ん中のウォブルが位相反転し、両側のウォブルを 1.5 倍の周波数のウォブルで挟んだ 3 ウォブルで構成され、MSK をウォブル番号 14～16 に配置した場合がデータ 0、ウォブル番号 12～14 に配置した場合がデータ 1 を表す。STW は、ウォブル番号 18～54 の立ち上がりが急峻で立ち下がりが緩やかなのこぎり波の 37 回の繰り返しでデータ 0 を、逆に、ウォブル番号 18～54 の立ち上がりが緩やかで立ち下がりが急峻なのこぎり波の 37 回の繰り返しでデータ 1 を構成する。なお、ADIP Unit のアドレス 1 ビットでは、MSK と STW で同一の情報を記憶させる。これにより MSK の情報ビットが、ウォブルシフトやディフェクトで検出不能な場合でも、STW が相補的に検出可能となり、信頼性が高いアドレス方式となることを狙う。

次に、図 3.19 に示すように、ADIP Unit が 83 連続して１つのアドレスを構成するワードを形成する。１つのワード中には 24bit のアドレス情報と共に、12bit の補助データ、後述するレファレンス STW、エラー訂正コードなどを格納する。相変化記録トラックに書き込まれる 64KB 毎のユーザデータに対し 3 個のアドレスワードを割り当てる想定とした。図 3.20 に、STW＋MSK のウォブルアドレスを適用したディスク模式図を示す。

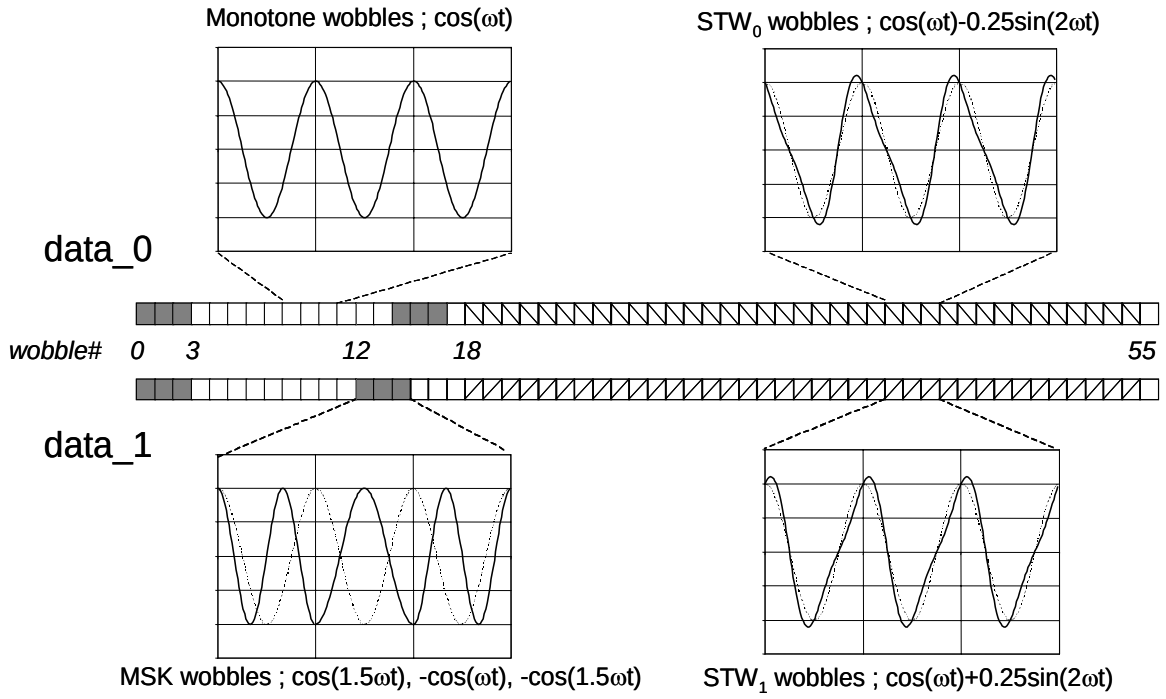


図 3.18　STW＋MSK のウォブルアドレス 1 ビット

0 = cos1.0w　1 = cos1.5w　4 = STW"1"　6 = Reference STW"0"
2 = -cos1.0w　3 = -cos1.5w　5 = STW"0"

ADIP No.	Wobble No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
0	monotone	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	sync0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	monotone	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	sync1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	monotone	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	sync2	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	monotone	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	sync3	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	reference	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0
9	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
10	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
11	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
12	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
13	reference	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0
14	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
15	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
16	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
17	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
18	reference	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0
19	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
20	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
21	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
22	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
78	reference	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	0
79	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
80	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
81	Data"1"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
82	Data"0"	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0

図 3.19　STW＋MSK のウォブルアドレスワード

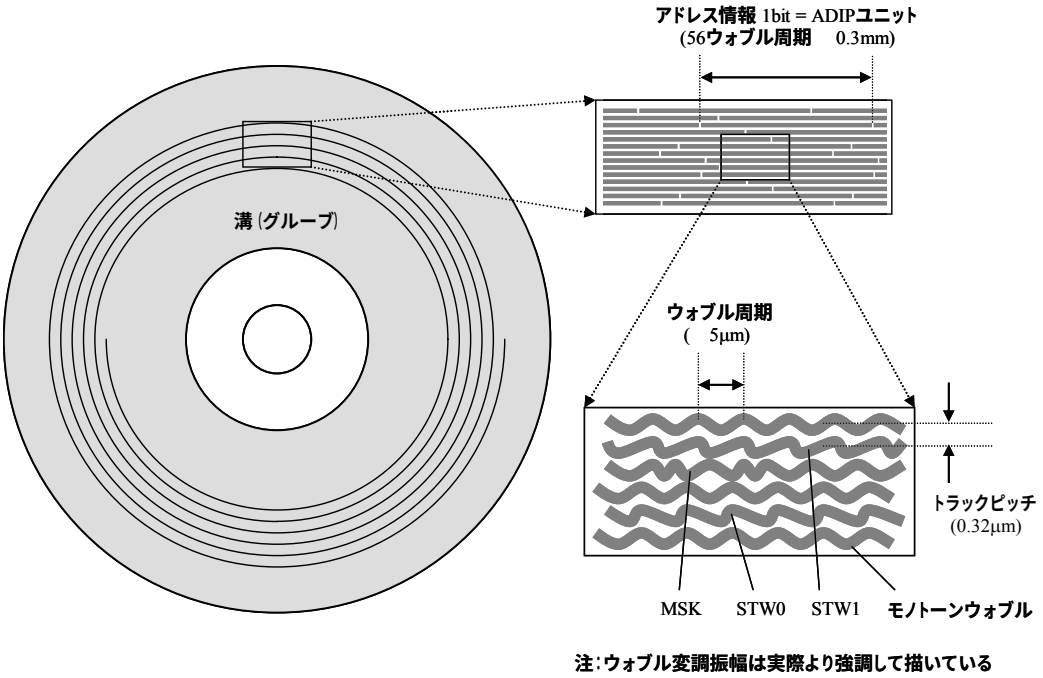


図 3.20　STW＋MSK のウォブルアドレスを適用したディスク模式図

3.3.4　位相補正と 2 次歪み

光ディスク上にウォブルトラックを CLV 方式で構成した場合、図 3.21 右に示すように、隣接ウォブルの位相が無相関となり、再生ウォブル信号にクロストークによるビートが発生する。トラックピッチを Tp、ウォブル 1 周期の長さ Wl とすると、ビートの周期は Wl／Tp*2π となる。Tp=0.32μm の Wl=5.14μm（69 クロックの正弦波）の CLV ディスクを作製し、波長 λ=405nm、NA=0.85 の光学系から得られたウォブル信号は、図 3.22 に示すように、約 2.5 周毎に約 6dB の振幅ビートが発生し、実際にクロストークの影響があることが分かった。

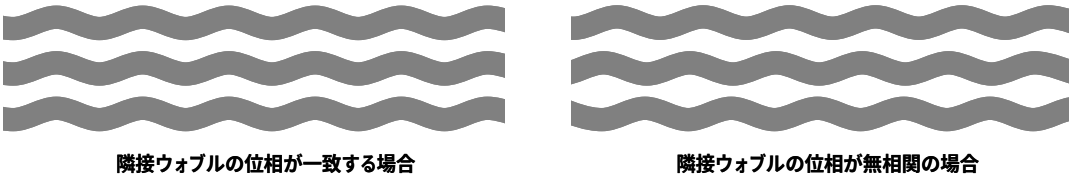


図 3.21　隣接ウォブルの位相関係

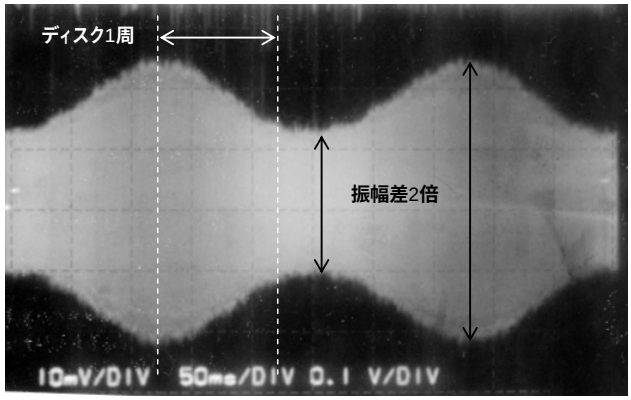


図 3.22　クロストークによる再生ウォブル信号のビート

本提案の STW ウォブルアドレスにおけるトラッククロストークの影響を調べるため、図 3.23 上の測定系で STW の基本波成分のクロックと 2 次高調波成分の位相差を評価した。結果は、図 3.23 下の波形に示すように、クロストークが最大の部分では、クロックの±90°位相に達する位相ズレが発生し、STW の検出に悪影響することが判明した。位相ズレを補正する目的で、レファレンス STW を設ける。クロストークは周期的かつ長周期で発生するので、予め値が 0 と分かっているレファレンス STW を 5 ADIP Unit 毎に設けることによって、レファレンス STW が正確に 0 として検出されるようにクロック位相を補正する仕組み [17]を導入した。

その回路方式は、図 3.24 に示すとおり、ウォブルの基本波 PLL で生成されるチャネルクロックから 34.5 分周して作る STW 用クロックの位相を、レファレンス STW を再生しているときにプリセットする。

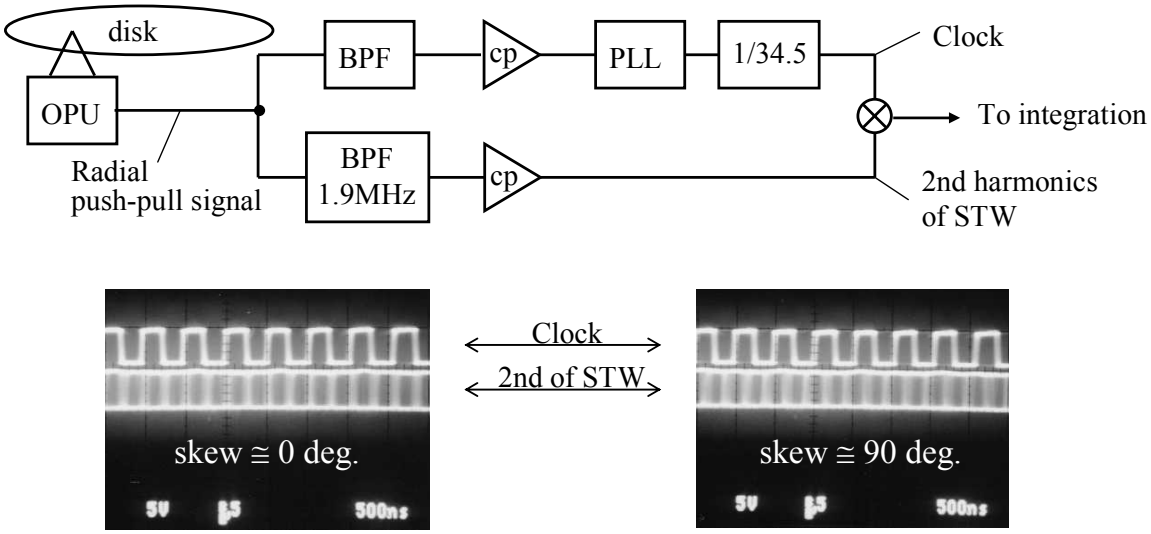


図 3.23　トラッククロストークによるクロックの位相ずれ

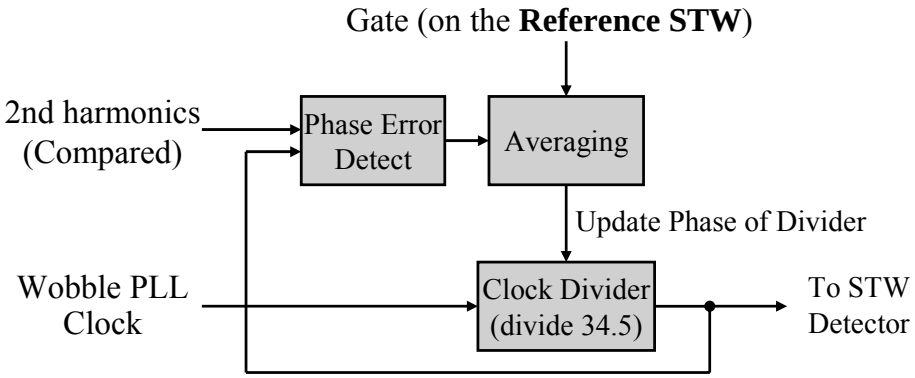


図 3.24　レファレンス STW を用いたクロックの位相補正回路

次に、ウォブルの 2 次歪み課題について考える。トラックのウォブルは、第 2 章 2.3 節で述べたように光ディスク原盤の作製時に EO ディフレクタで記録ビームを偏向させることにより形成される。ディフレクタの変調特性の非線形性や原盤記録ビームの収差が大きいと、形成されるトラック形状が歪み、再生ウォブル波形に高調波歪みが発生する。STW は、2 次

高調波を信号成分として情報付加する方式である。もしウォブルに 2 次歪みが発生すると、2 次高調波歪み SHD（Second Harmonic Distortion）が、STW の 2 次高調波成分 SHL（Second Harmonic Level）と混変調を起こして、STW の読み出しエラーレートを悪化させる課題が生じる。実際、図 3.25 の様に、大きな SHD が生じているサンプルディスクでは、ラジアルチルトマージンが狭いことが分かった。

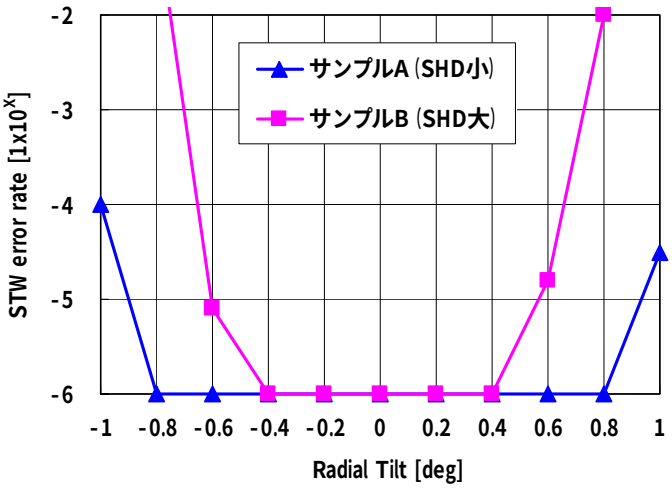


図 3.25　STW 検出エラーレートのラジアルチルトマージン

対策として、ディスクの一部エリアに STW が追加されていない基本波成分と MSK だけのトラックを作成し、この部分の SHD を測定する仕組みを導入した。図 3.26 は、前記サンプルの再生ウォブル信号のスペクトラムを示す。右側に示すサンプル A の正常トラックでは、STW を含まない MSK のみの場合、2 次歪成分 SHD は小さいが、左側に示すサンプル B の異常トラックでは、記録されていない SHD が検出され、STW+MSK の 2 次信号成分 SHL の中に、SHD が混入している。この SHD が本来の STW 成分の SHL より十分小さい事を確認するスペクトラム測定では、CLV に由来するビートが発生し、キャリア部で最大最小が時間変化してしまう。そこで図 3.27 に示すゼロスパン測定法を導入した。図 3.27 左は、ウォブル信号を 3MHz 周波数スパンで測定したもので、957KHz のキャリアと、1913KHz の STW の 2 次成分が観測されるが、そのレベルは時間と共に変動し判断が難しい。一方、図 3.27 右に示すゼロスパン測定法では、キャリア CNR の測定と共に、STW が入っていないトラックで SHD を、STW を含む通常のトラックで SHL を捕らえ、その差 SHD/SHL が-12dB 以下であることをそれぞれ時間変化として容易に確認できる。

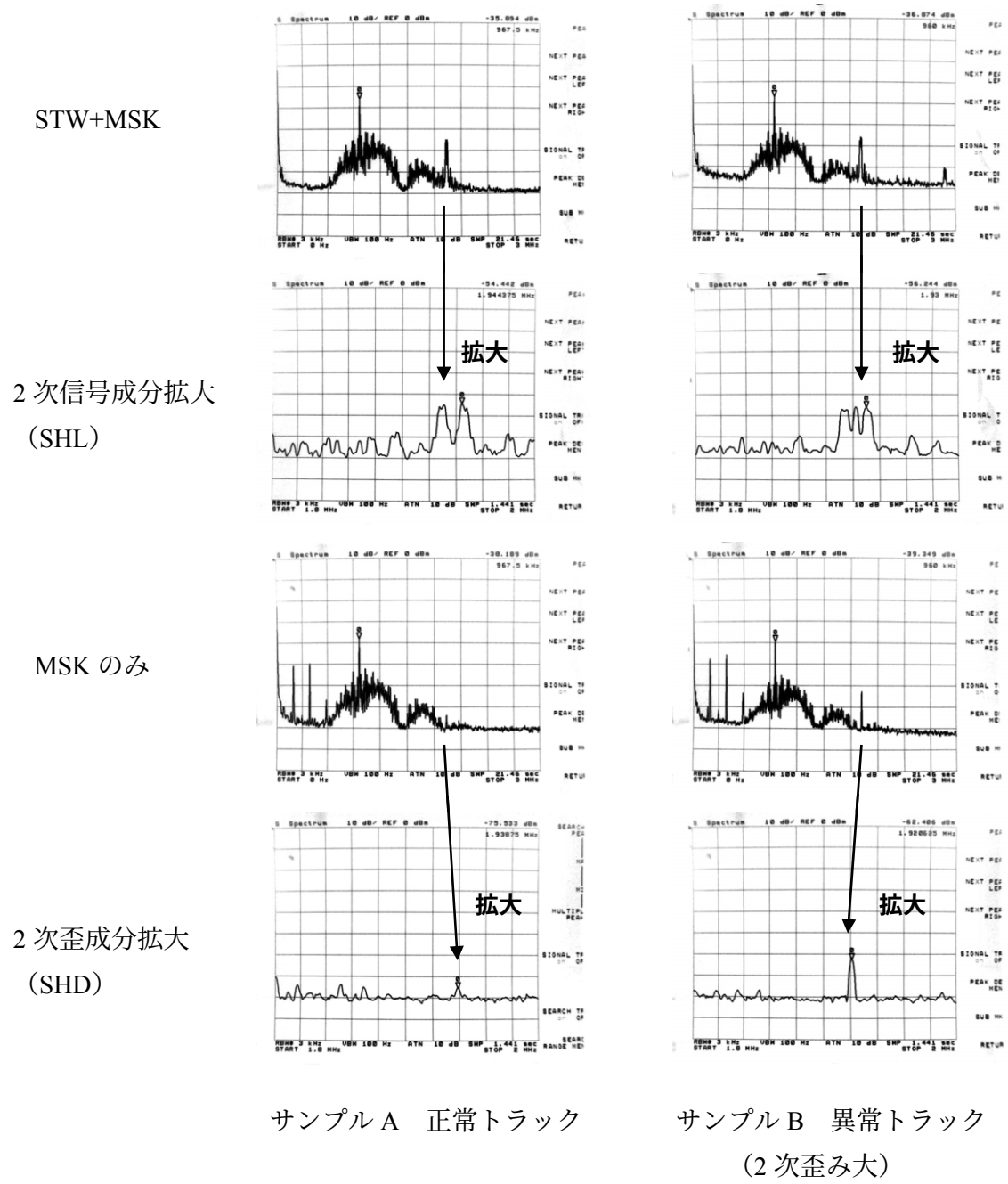


図 3.26　再生ウォブル信号のスペクトラム

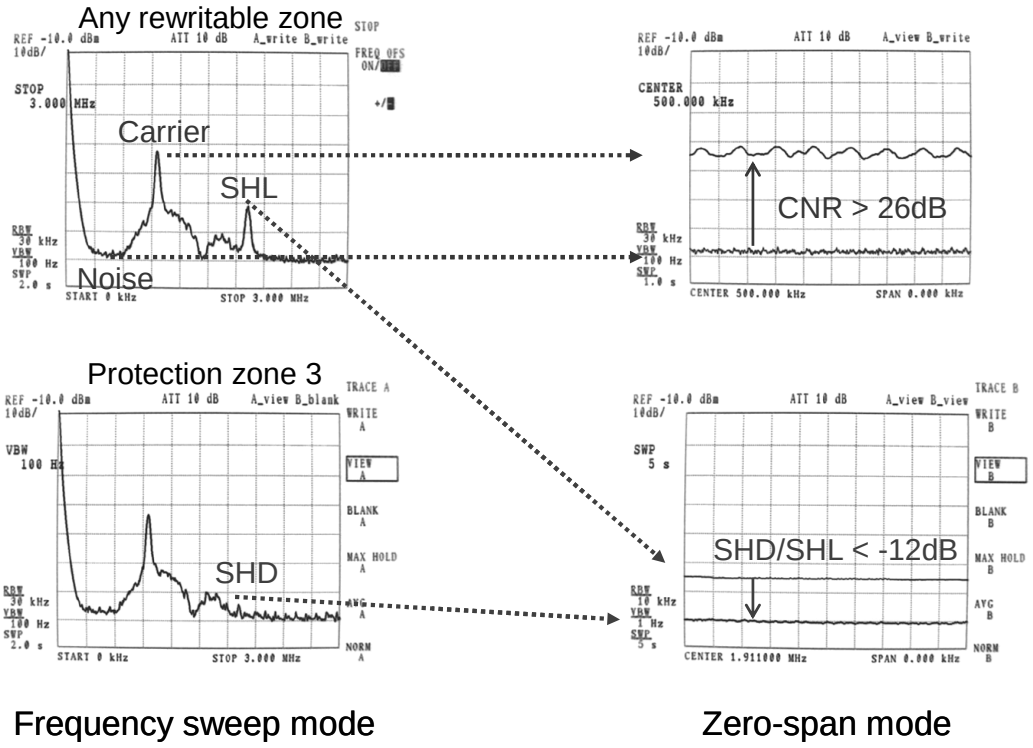


図 3.27　ウォブルの SHL/SHD を測るゼロスパン測定法

3.3.5　検出方式と検証結果

STW および MSK の情報検出には、ウォブルに同期したクロックとの乗算によるヘテロダイン検出方式を用いる。図 3.28 に示すヘテロダイン検出回路のブロック図を用いて動作を説明する。まず、①プッシュプル系から検出された差動信号に BPF 956kHz を通して基本波成分を抽出する。コンパレータで 2 値化して、システムクロック 66MHz の 69 分周と位相比較する PLL で 69 分周のウォブル基本クロック 957KHz を再生する。次に、②同差動信号に BPF 1.91MHz を通して 2 次成分を抽出する。コンパレータで 2 値化して、66MHz の 34.5 分周と位相比較しレファレンス STW で位相補正された 2 倍ウォブルクロック 1.91MHz を再生する。③同差動信号と基本クロックを乗算し、MSK 部分を積分する。中間の 16.5 番のウォブルでサンプル＆ホールドすることで、積分値は MSK の 0 または 1 に対応した極性となる。これをコンパレータで 2 値化することで MSK 検出データを得る。更に、④同差動信号と 2 倍クロックを乗算し、STW が 37 回繰り返される区間を積分する。最後の 55 番のウォブルでサンプル＆ホールドすることで、積分値は STW の 0 または 1 に対応した極性となる。これをコンパレータで 2 値化することで STW 検出データを得る。⑤MSK と STW のホールドした積分値を加算することにより MSK と STW の両方を用いたハイブリッド検出データを得ることが出来る。

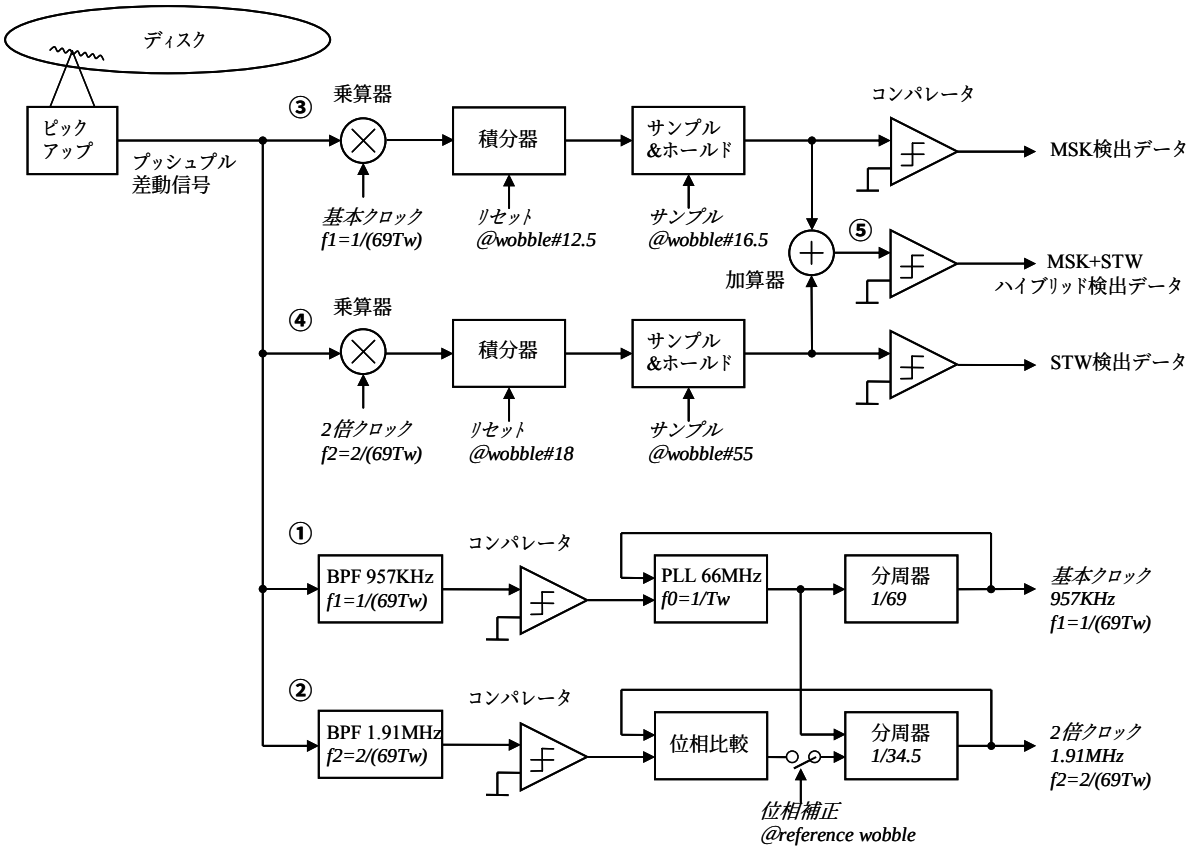


図 3.28　STW＋MSK ウォブルのヘテロダイン検出回路

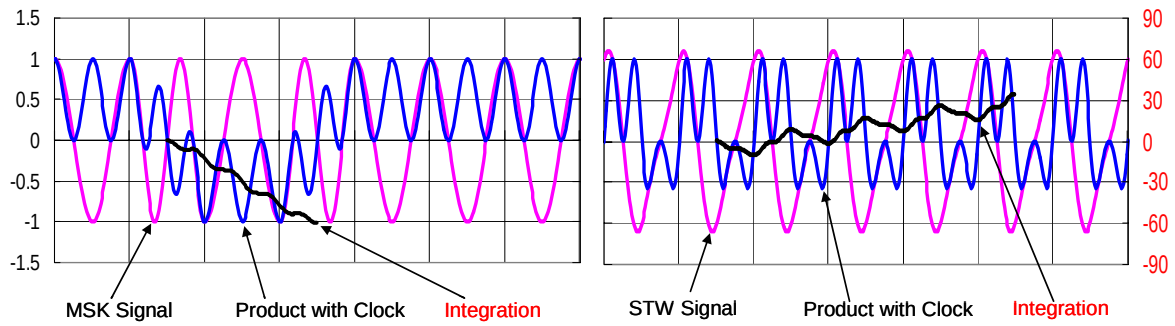


図 3.29　STW＋MSK 検出回路の内部動作信号

図 3.29 は STW＋MSK ヘテロダイン検出回路の内部動作信号(シミュレーション)を表す。図において左のグラフが MSK の検出、右のグラフが STW の検出を表す。MSK/STW Signal（ピンク）がウォブル検出信号、Product with Clock（青）がクロックとの積、Integration（黒）が積分値である。

図 3.30 は、MSK と STW を個別に検出した場合に、ウォブルシフト量と検出感度の相対 SNR の関係を計算プロットしたものである。もしウォブルシフトが全くなければ MSK 検出 SNR が 1.6dB 高い。SNR が高いということは、ノイズに対する耐性が優れていることを意味する。一方、ウォブルシフトがある場合に MSK は検出感度を失うが、±3 ウォブルのシフトが発生しても STW の検出感度は安定である。このように MSK 検出はノイズに対してよりロバストで、一方 STW 検出はウォブルシフトに対してよりロバストである。この相反な特徴の理由は、それぞれの溝ウォブルへの挿入形態に起因する。すなわち、MSK は局所領域に基本波の強い位相変化で情報を記憶しているので SNR が優れているのに対し、STW は 37 周期に渡って広範囲に情報が分散しているので、多少の位置ずれに対し性能劣化がない。一方、逆の観点からは、MSK はたった 3 周期に配置されているので、ADIP Unit の先頭を見つけるビットシンクとして、より良い位置情報を与える。STW は広い領域にわたって配置されているので､局所欠陥に対して鈍感であると言える。1 つのアドレスフォーマットに MSK と STW を組み合わせた結果、ノイズとディフェクト、ウォブルシフトと位置正確さといったタイプの異なる歪みと性能に対して強い耐性と十分な読み取り性能が期待できる。

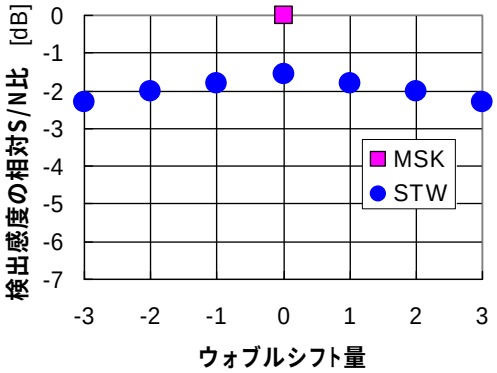


図 3.30　STW と MSK ウォブルアドレスの検出 SNR

ここで、レファレンス STW による位相補正の効果について実験結果を示す。図 3.31 はテ

スト信号として X1010 のアドレス情報を繰り返し記録したサンプルディスクの STW のヘテロダイン検出回路の動作波形である。図 3.31 上は、レファレンス STW による位相補正を OFF とした場合で、STW の積分値がディスク 2.5 周の周期で減衰しているのが分かる。これは先に述べた、トラッククロストークによるビートが原因で、クロックの位相シフトが周期的に起こったためである。一方、図 3.31 下は位相補正を ON とした場合で、前記ビートは解消され、積分値は安定している。即ち、レファレンス STW による位相補正方式を導入することによって、ディスク 2.5 周の周期で起こっていたクロストークの影響を確実に回避出来ている。

更に、STW と MSK の検出相補性について実験結果を示す。図 3.32 は、前記と同じサンプルディスクの STW と MSK のヘテロダイン検出回路の動作波形である。図 3.32 上は、通常時の様子で、MSK と STW 共に正常な積分値が得られておりエラーは無い。図 3.32 中は、SNR 限界を想定した模擬条件として、再生パワーを規定値の 1/3 に下げた場合である。積分値のエンベロープの変動からノイズが増加したことが分かる。この状態で STW はエラーを起こしたが、MSK は正常に検出できた。MSK の検出 SNR が優れていることが分かる。一方、図 3.32 下は、ビットシンク MSK 上に故意にディフェクトを設け、同期外れ（ウォブルシフト）を発生させた場合である。この時、データ MSK の積分値は異常値を示し検出不能になっが、STW は正常な積分値を維持して検出エラーは発生しなかった。即ち、MSK と STW は、一方で検出不能となるような外乱が加わっても、他方で読み出しが可能となる相補的な状態が実際にあり、2 方式を併用する本方式の有効性が証明された。

ディスク 2.5 回転

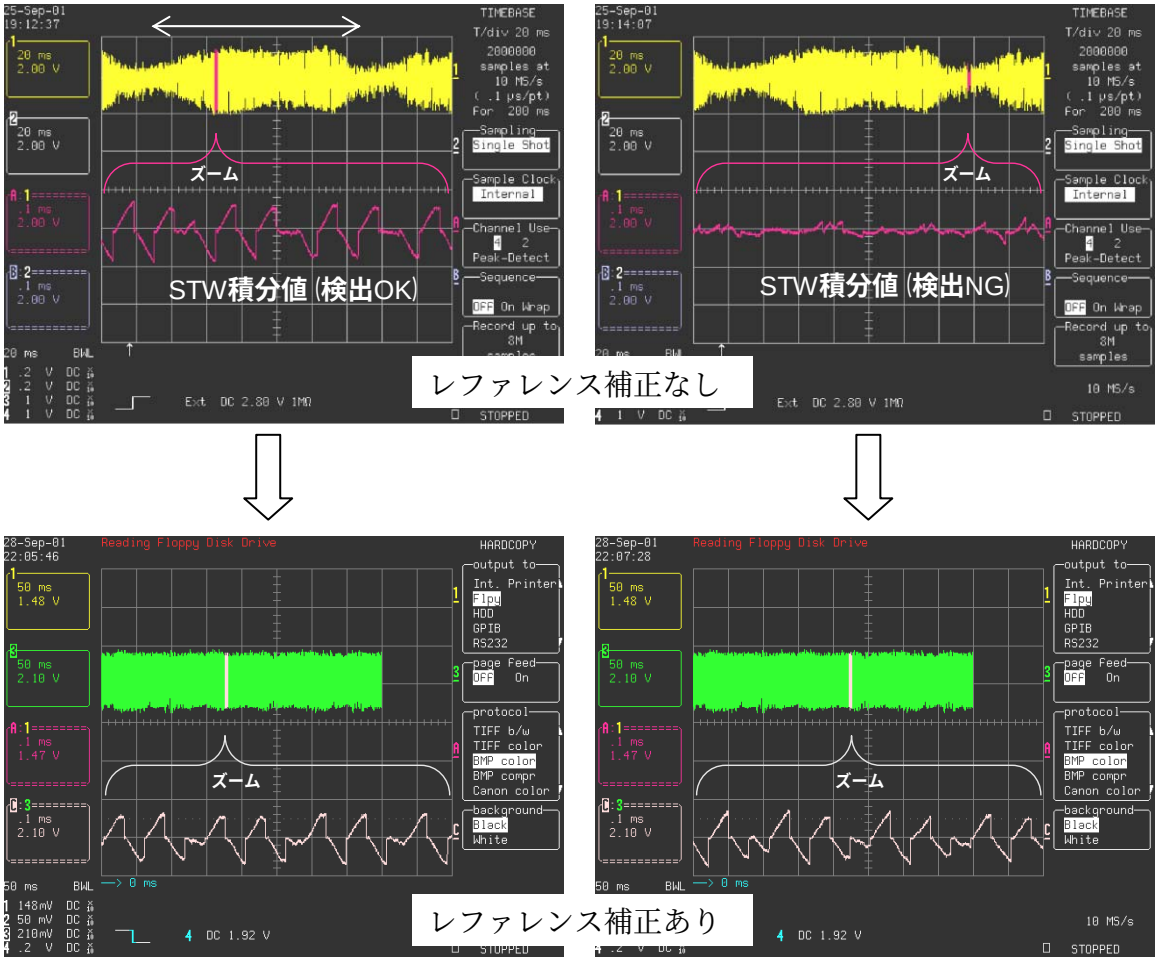
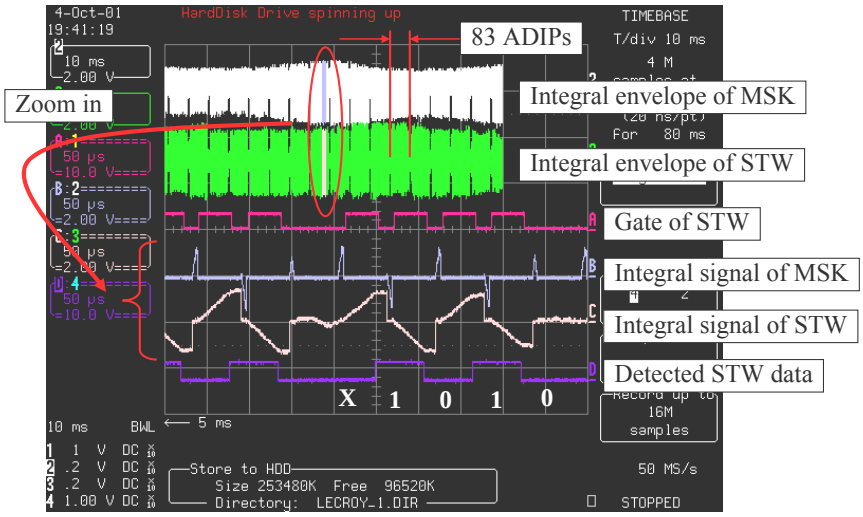
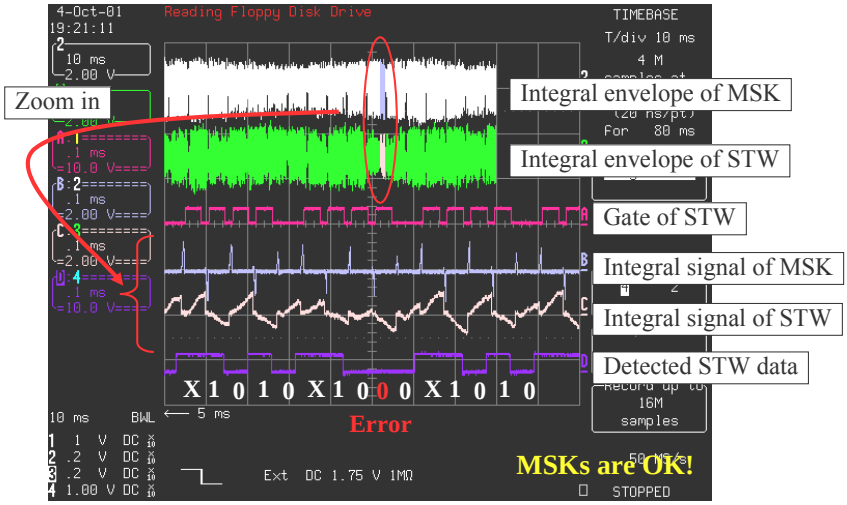


図 3.31　レファレンス STW による補正効果

通常時
（共にエラー無し）



SNR 限界時
（STW エラー発生、
MSK エラー無し）



ウォブルシフト時
（STW エラー無し、
MSK エラー発生）

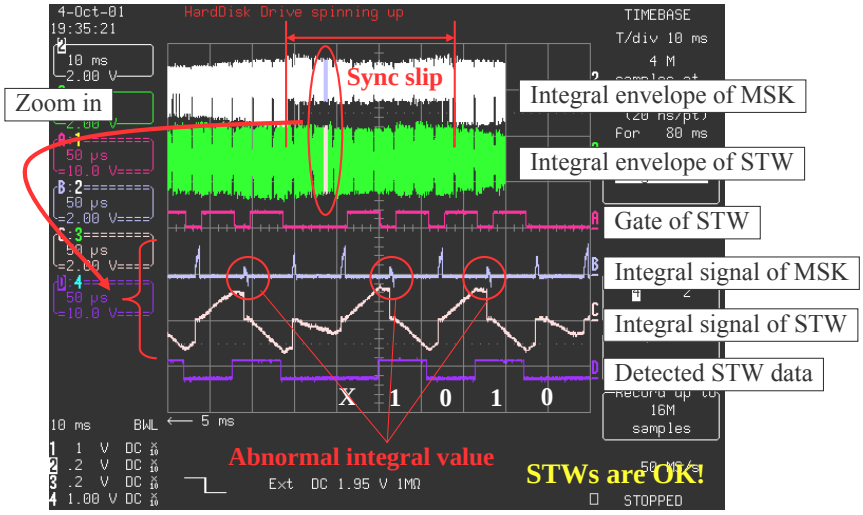


図 3.32　STW＋MSK 検出における積分値と検出エラー

最後に、ハイブリッド検出方式[18]の検証結果を示す。ADIP Unit 内に MSK と STW により同じ情報を重複して時間的に分割多重したので、別々に検出が可能だが、それぞれの積分結果を加算するハイブリッド検出も可能である。図 3.33 は、テストディスクのデータ記録済みトラックを用いて、MSK 単独検出、STW 単独検出、そして MSK+STW ハイブリッド検出のラジアルチルトマージンを示したものである。この測定には記録によるノイズ、ウォブルシフト、ディフェクト、および隣接トラックからのクロストークの全ての影響を実際に含んでいる。それにも関わらず、必要とされる 10^{-4} 以下の ADIP ビットエラーレートを広範囲のチルトで達成している。相変化記録されるユーザデータの実用的なマージンは±0.7 度程度なので、アドレスマージンの方が遙かに広く高信頼であることが確かめられた。更に、図 3.34 は検出積分値を時系列に見たアイパタンを示す。CLV フォーマットの本テストサンプルでは ADIP Unit がディスク約 150 回転毎に隣接トラックに配列することになる。そのため STW 単独検出や MSK 単独検出では、150 回転周期でクロストークが悪化する。それぞれアイパタンが狭くなっている領域が存在するが、MSK+STW ハイブリッド検出では常にアイが開いている。ハイブリッド検出により MSK と STW の検出能が相互補完され、極めて読み出し信頼性が高いことが確認できた。

以上の検証結果から次のことが言える。即ち、断続の無い連続グルーブで構成された本提案の STW 物理アドレス方式は、多層光ディスクに用いても原理的に層間クロストークが発生しない。また、多層化によって信号レベルが比較的小さくなる高密度相変化光ディスクに適用した場合でも、MSK アドレスを併用することにより、光ディスクで想定されるあらゆる歪みに対して検出能力の高いアドレス方式となる。従って、多層化を前提とする高密度相変化光ディスクの物理アドレス方式に適用することに極めて好適である。

なお、本提案の STW 方式は、BD メディアの物理フォーマットとして、2002 年に容量 25GB・50GB の BD-RE Ver.1 に規格採用[19]された。以降、2005 年の BD-R 規格、2010 年には容量を 100GB に拡大した BD-XL 規格[20]にも継承された。

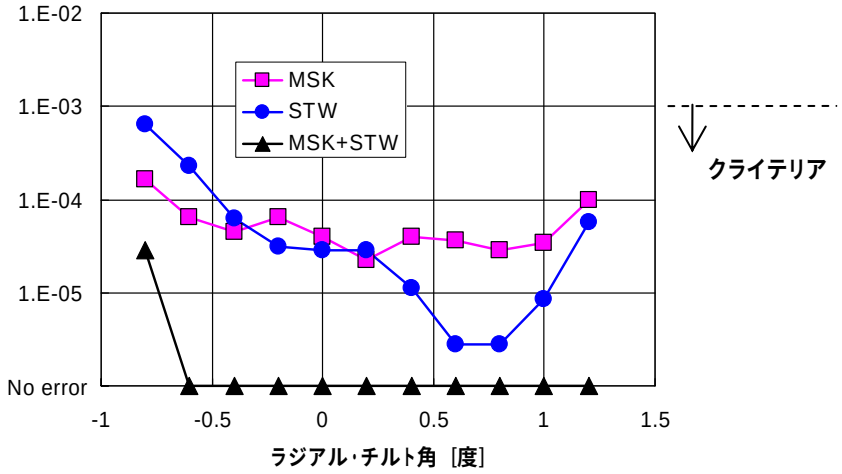


図 3.33　STW＋MSK ウォブルアドレスのチルトマージン

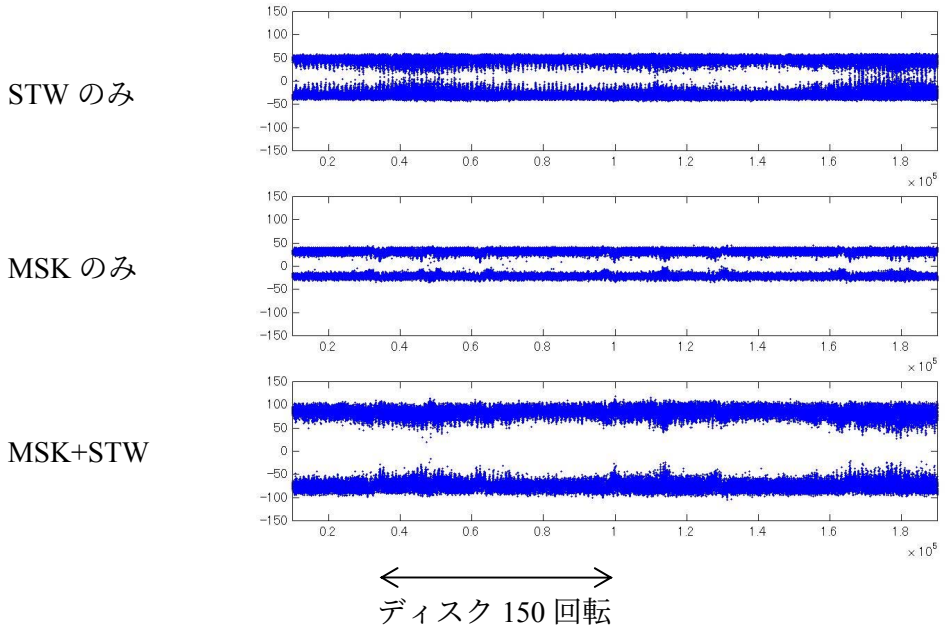


図 3.34　STW＋MSK ウォブルアドレスの検出アイパタン

3.4　まとめ

相変化材料の持つ特徴とポテンシャルを最大限に引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶することができるメディア形態の具現化に向けて、高いデータ記録密度と優れた信頼性を兼ね備えた、相変化光ディスクの物理アドレス方式の提案と検証を行った。

まず、波長 650nm の赤色レーザを用いた書き換え型相変化光ディスクの実現を目指し、高密度記録のランド&グルーブ記録方式の信号トラックに好適な、１対になったオフセットピットアドレスの CAPA を提案し検証した。CAPA 方式は、光スポットがトラックオフセットしても、対になっているどちらか一方が常に読める特徴を有する。実験により、オフトラック状態でもアドレス検出の信頼性が極めて高いことを実証した。本方式により、ランド＆グルーブ方式の高密度トラックにセクタ毎に記録されるユーザデータへのアクセス精度と書き換え信頼性が飛躍的に向上した。

次に、波長 405nm 青色レーザを用いた多層書き換え型次世代光ディスクの実現を目指し、連続グルーブ記録方式の信号トラックに好適な、鋸波形状をした STW と局所位相変調による MSK を併用したウォブルアドレス方式を提案し検証した。STW と MSK は相補的な特性を有し、ハイブリッド検出方式により光ディスクで想定されるあらゆる歪みに対して極めて検出能力が高いことを実証した。本方式により、多層化を前提とする相変化光ディスクの各層に高密度記録されるユーザデータへのアクセス精度と書き換え信頼性が向上した。

参考文献

1) 永井隆弘、石田隆、高木裕司、久門裕二、佐藤勲、北浦秀樹、太田威夫: “相変化光ディスクの狭トラックピッチ化に対する検討”, 第 6 回相変化記録研究会, シンポジウム講演予稿集 (1994) 47.
2) N. Miyagawa, Y. Gotoh, E. Ohno, K. Nishiuchi, and N. Akahira: “Land and Groove Recording for High Track Density on Phase-Change Optical Disks”, Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) 5324.
3) E. Ohno, K. Nishiuchi, Y. Sakaue, K. Ide, K. Nagata, N. Miyagawa, and N. Akahira: “Phase Change Optical Disks for Land and Groove Recording”, Tech. Dig. of Symp. on Optical Memory '94 (1994) 39.
4) 古宮成、上岡優一、具島豊治: “光ディスクの ID 検出回路”, 特願平 8-144033 (1996).
5) 古宮成、久門裕二: “相変化光ディスクの信号処理方法および相変化光ディスク装置”, 特許第 4178267 号 (2008).

6) ISO / IEC 16824: Information Technology-120 mm DVD-Rewritable Disk (DVD-RAM) (1999) 26.
7) JIS X6282; “情報交換用 120mm 追記形光ディスク(CD-R)”, 日本工業規格 (2009) 19.
8) 徳丸春樹、横川文彦、入江満: “図解 DVD 読本”, オーム社 (2003) 138.
9) DVD+RW Alliance: White Paper of DVD+RW Physical Format Explanation http://www.dvdservices.org/information/DVDRW_Physical_Format_Explanation.pdf (2003) 7.
10) I. Ichimura, S. Masuhara, J. Nakano, Y. Kasami, K. Yasuda, O. Kawakubo, and K. Osato: “On-Groove Phase-Change Optical Recording for a Capacity of 25 GB”, Optical Data Storage 2001 (ODS2001), Proc. SPIE **4342** (2002) 168.
11) M. Kuijper, I. Ubbens, L. Spruijt, J. M. Meeulen, and K. Schep: “Groove-Only Recording under DVR Conditions”, Optical Data Storage 2001 (ODS2001), Proc. SPIE **4342** (2002) 178.
12) S. Furumiya, J. Minamino, H. Miyashita, A. Nakamura, M. Shouji, T. Ishida, and H. Ishibashi: “Optical Disk Recording System of 25GB Capacity”, Optical Data Storage 2001 (ODS2001), Proc. SPIE **4342** (2002) 186.
13) 石橋広通、古宮成、南野順一、東海林衛、石田隆: “高密度光ディスク記録媒体における物理アドレス新方式”, 信学技報 CPM2001-75 (2001) 25.
14) J. Minamino, M. Nakao, N. Kimura, M. Shouji, S. Furumiya, H. Ishibashi, and E. Ohno: “Practical Study of Saw-tooth Wobble Addressing by Theoretical and Experimental Approaches”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1741.
15) S. Furumiya, S. Kobayashi, B. Stek, H. Ishibashi, T. Yamagami, and K. Schep: “Wobble-Address Format of the Blu-ray Disc”, Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage 2002 (ISOM/ODS2002), Tech. Dig. (2002) 266.
16) S. Kobayashi, S. Furumiya, B. Stek, H. Ishibashi, T. Yamagami, and K. Schep: “Wobble-Address Format of the Blu-ray Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 915.
17) 南野順一、中尾政仁、古宮成、石橋広通: “再生方法および装置”, 特許第 4267901 号 (2009).
18) 中尾政仁、木村直浩、古宮成、南野順一、石橋広通: “アドレス情報再生方法およびアドレス情報再生装置”, 特許第 4295518 号 (2009).
19) 小川博司、田中伸一: “図解ブルーレイディスク読本”, オーム社 (2006) 157.
20) Blu-ray Disc Association: White Paper of Physical Format Specifications for BD-RE, 3rd edition http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/BD-RE_physical_format_specifications-18325.pdf (2010) 38.

第4章　高密度データ記録再生技術の開発

4.1　はじめに

光ディスクのマークエッジ記録（Mark Edge Recording）は、元データを記録クロック単位のラン制限（RLL：Run Length Limited）した変調データに変換し、変調データの 1 と 0 の連続個数に対応した長さのマークとスペースを信号層に形成する。再生専用型光ディスクの CD-ROM の例では、記録クロックの 1 周期を T とすると、最短 3T～最長 11T までの長さのピットとランドで記録されている。ROM は、ディスク 1 枚毎にデータを記録するのではなく、予め記録された原盤から大量複製される。その原盤へのデータ記録は、フォトレジストの露光で行うが、レーザパルスの照射時間と形成されるマークの長さが線形な関係のフォトンモード記録である。図 4.1 のように、記録データよりも記録レーザパルスを短く発光させることで、記録ビームの広がり分を補正し、原盤上に記録データ長に対応したマークとスペースが形成される。原盤のマークとスペースが、複製により ROM ディスクのピットとランドに対応する。

一方、本研究の相変化書き換え型光ディスクのマークエッジ記録は ROM ディスクと少々異なる。相変化光ディスクのマーク形成は、レーザパルス照射により記録膜を加熱溶融させるヒートモード記録であり、レーザパルスの照射時間と形成されるマークの長さは非線形な関係となる。前述の ROM ディスクの様に矩形のレーザパルスを照射すると、記録膜の蓄熱効果のために、長いマークは後半部ほど幅太くなり歪んだ形状となってしまう。このマーク形状歪みを低減するために、記録パルスを細いパルス列に分割して照射し、記録膜に蓄積される熱量を制御する記録方法が有効であり、マルチパルス記録 [1,2]と呼ばれる。相変化光ディスクでマルチパルス記録をする例を示す。図 4.2 のように、長いマークを記録するときのマーク始端パルスは書き始めに必要な熱量を確保するために記録クロック 1T 幅以上の Peak パワーを照射し、中間パルスは Peak パワーと Bias パワーを 0.5T 幅で交互に照射して加熱を抑制し、マーク終端パルスはマークエッジを確実に記録するために中間部分よりやや幅広の Peak パワーを照射する。

光ディスクでマークを記録するためのレーザパルスの照射方法のことをライトストラテジと言う。ヒートモードの高密度記録において、マークとスペースのサイズが小さい時に顕著に発生する課題としてエッジシフトがある。本章では、相変化光ディスクの高密度データ記録時に発生するエッジシフト課題を解決する新しいライトストラテジを提案し検証する。

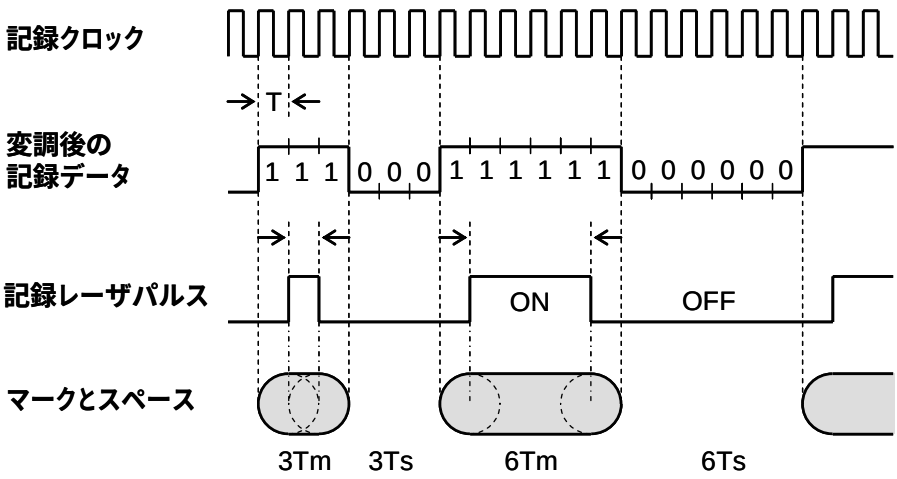


図 4.1　ROM ディスク原盤の記録レーザパルスとマーク形状の関係

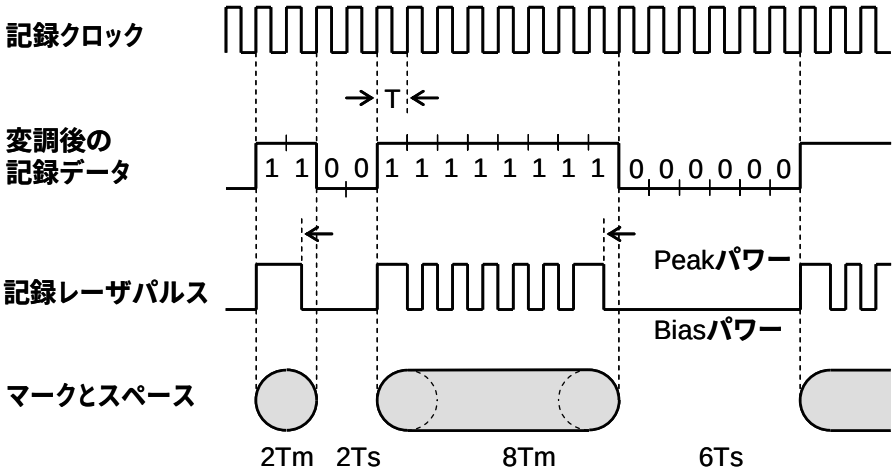


図 4.2　相変化光ディスクの記録レーザパルスとマーク形状の関係

4.2　パタン適応型記録補償方式

4.2.1　エッジシフト課題の要因解析

相変化型光ディスクの高密度データ記録時の課題を検討するため、図 4.3 に示す録再評価系を用いて実験した[3)]。波長λ=785nm 半導体レーザ、対物レンズ NA=0.55 の光学系を用い、トラックピッチ Tp=1.2μm の相変化光ディスクに、線速度 Lv=18.1m/s でマークエッジ記録した。信号発生回路で記録クロック 47.25MHz の(1,7)RLL データを発生し、記録補償回路でマルチパルス化した。本実験の(1,7)RLL 記録データに対する標準的なマルチパルス波形を図 4.4 に示す。この信号に基づいてレーザ駆動回路により半導体レーザをスイッチング駆動し、OPU から Peak=19mW、Bias=10mW のパワーで回転するディスクに光パルスを照射して記録した。再生は、ディテクタから得られる再生 RF 信号を、群遅延フラットのコサインイコライザで波形等化した。オシロスコープでアイパタンを確認すると共に、2 値化して TIA に入力した。TIA では 2 値化信号のエッジ間隔の分布平均値 $\bar{x}$と標準偏差σ（ジッタ）を測定した。なお、コサインイコライザは、ピーク周波数が 18MHz で、DC ゲイン 0dB、ピークゲイン+6dB の特性とした。

記録再生結果のアイパタンを図 4.5 に、TIA によるジッタ分布を図 4.6 に示す。アイパタン波形では、振幅の下側がアモルファスマークレベルで、上側は結晶スペースレベルを表す。再生信号を多重表示したアイパタンは、本来 1 本に重なるべき傾斜部分の波形が複数本に分かれて観測され、特にマーク始端側のばらつきが大きい事が分かる。また、ジッタ分布は幅が広く正規分布より歪んでいる。記録したマークのエッジがずれる「エッジシフト」が発生していると考えられる。

本結果を受けて、エッジシフトの発生の規則性について詳しく調べることにした。まず、そのためにエッジシフトの測定法について検討した。

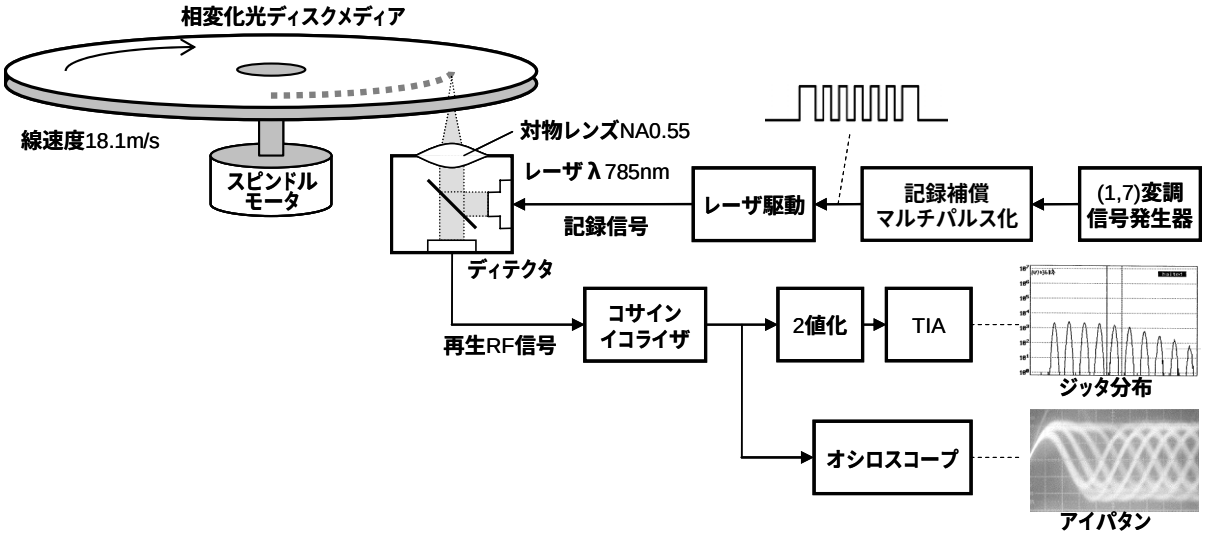


図 4.3　実験に用いた録再評価系

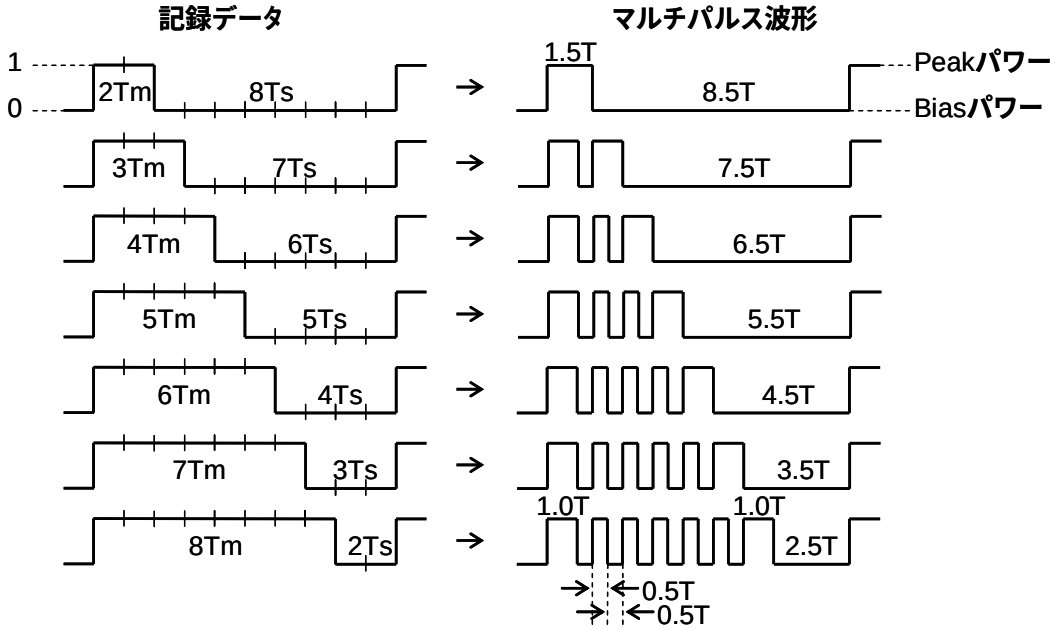
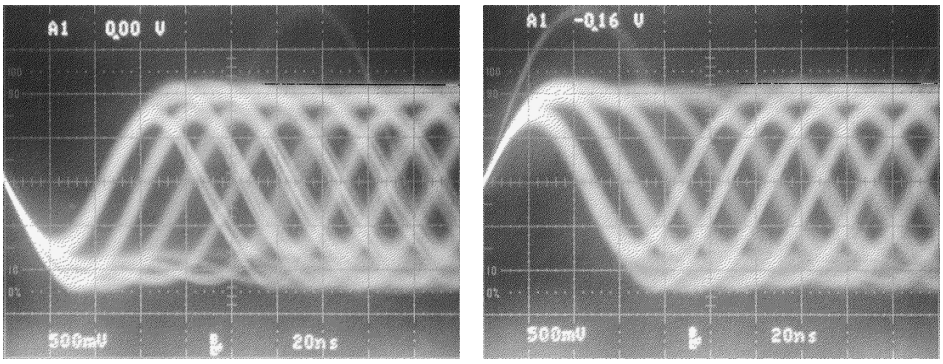
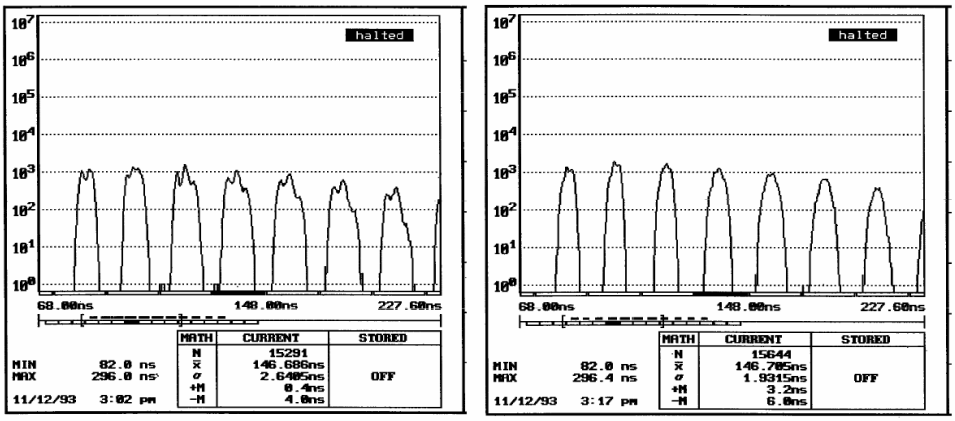


図 4.4　(1,7)変調の記録データに対する標準的な記録波形



マーク始端トリガ　　マーク終端トリガ

図 4.5　標準記録波形による再生アイパタン



マーク始端トリガ　　マーク終端トリガ

図 4.6　標準記録波形による再生ジッタ分布

記録データに含まれるマーク長毎、スペース長毎のエッジシフト量を測定するために、図 4.7 に示す孤立マークパタンおよび孤立スペースパタンを導入した。(1,7)RLL マークエッジ記録で最長周期となる 8T マーク／8T スペース（以下、8Tm/8Ts と略す）の境界エッジを、エッジシフトを測定するための基準エッジとした。孤立マーク（または孤立スペース）パタンは、8Tm／8Ts 連続信号の一部に、孤立マーク（または孤立スペース）を挿入した波形である。例えば、孤立 2Tm の始端位置は、後ろの基準エッジからの 10T 間隔を、孤立 2Tm の終端位置は、前の基準エッジからの 10T 間隔を測定する。

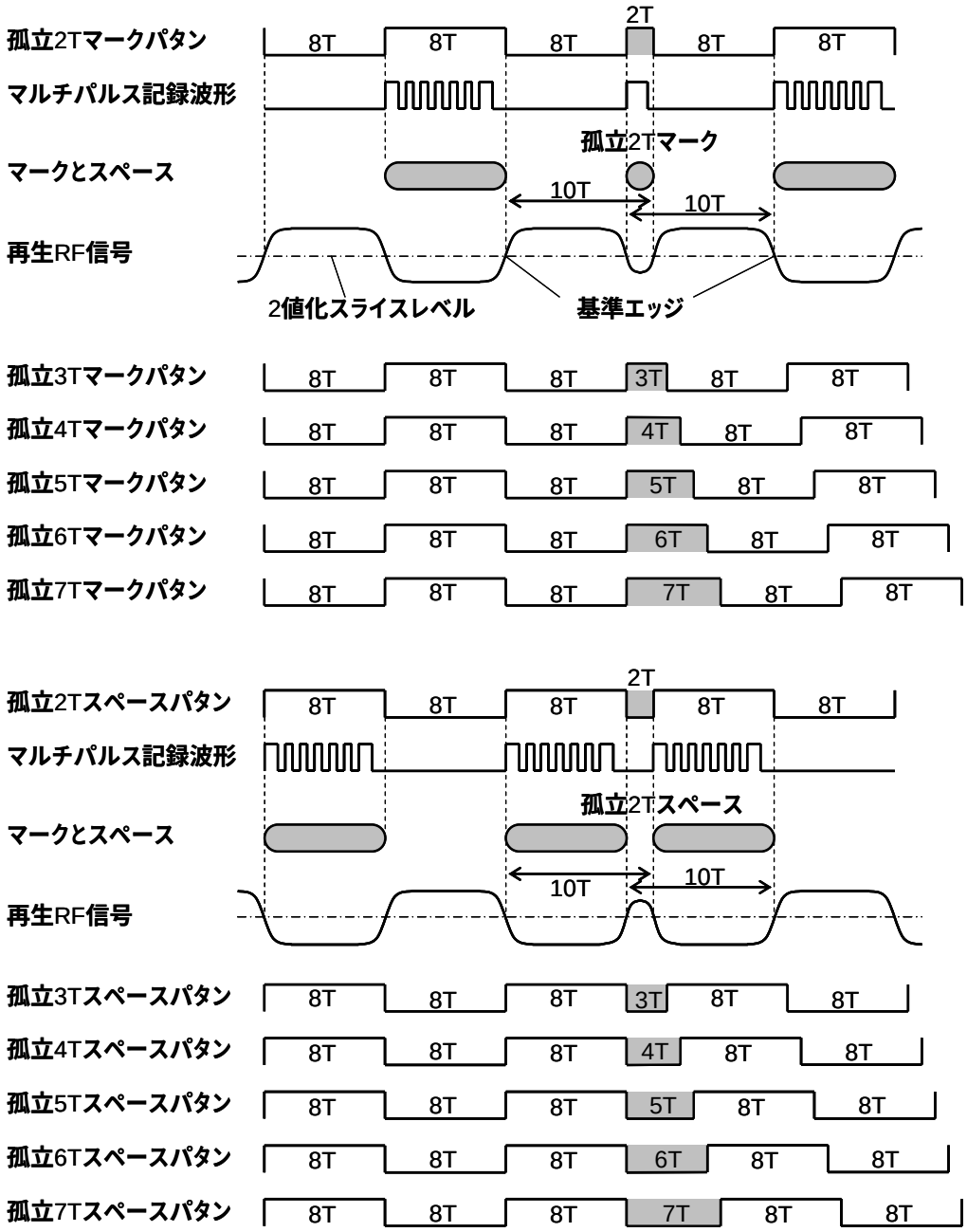


図 4.7　孤立マークパタン･孤立スペースパタン

次に、これら孤立マークパタンおよび孤立スペースパタンを記録再生し、TIA でエッジシフトを測定した。結果を図 4.8 に示す。グラフの横軸は孤立マーク長または孤立スペース長を表し、縦軸は被測定エッジのシフト量を T（T は記録クロックのウインドウ幅）で正規化した値 Jitter/T [%]を表す。0 は期待値を表し、正のとき検出エッジが期待されるエッジ位置より遅れたことを、負のとき検出エッジが期待されるエッジ位置より早いことを表す。ここで、＋4.4σおよび－4.4σの値は、ジッタを正規分布と仮定した時、エラーレートが 1×10^{-5} になる範囲を表す。グラフより、2T、3T のマーク及びスペース（2Tm、3Tm、2Ts、3Ts）で顕著なエッジシフトが発生しており、4T～8T ではずれが小さいことが判る。以下、これらの現象について考察する。

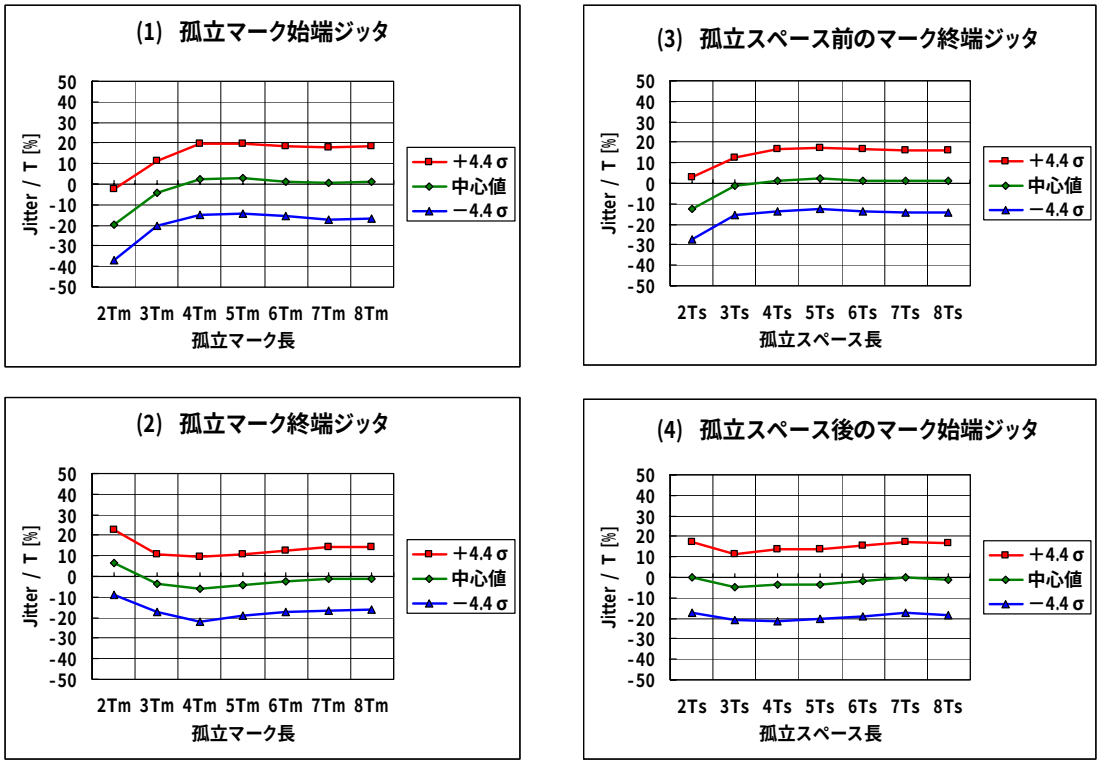


図 4.8 孤立マークパタン･孤立スペースパタン記録再生のエッジシフト

短マークの熱非線形（図 4.9）：

孤立マークに着目した時、8Tm～4Tm のエッジシフトは小さく、3Tm、2Tm とマークが小さくなるほどエッジシフトが大きくなる理由について考える。図 4.4 に示した記録波形は、8Tm～4Tm では中間部分のパルス数が異なる以外は共通の構成である。従って、4T 以上のマ

ークでは始端終端部の加熱放熱条件は似ていると考えられる。一方、3Tm は中間部分に 0.5T 幅の Bias パワー期間を設けただけであり、更に、2Tm は 1.5T 幅の単パルスとなっており、どちらも 4Tm～8Tm とは記録波形構成が異なっている。また、図 4.8 の(1)と(2)の結果は、2Tm、3Tm の始端終端がそれぞれマークが大きくなる方向にエッジシフトしていることを示している。3Tm、特に 2Tm は、4T 以上の長いマークに比べて周囲への放熱性が高いので急冷となり、アモルファス形成が過剰となると考えられる。即ち、短マークの記録は、長マークと比較して記録波形構成と冷却条件が異なるため熱非線形が生じ易く、エッジシフトが発生すると考えられる。

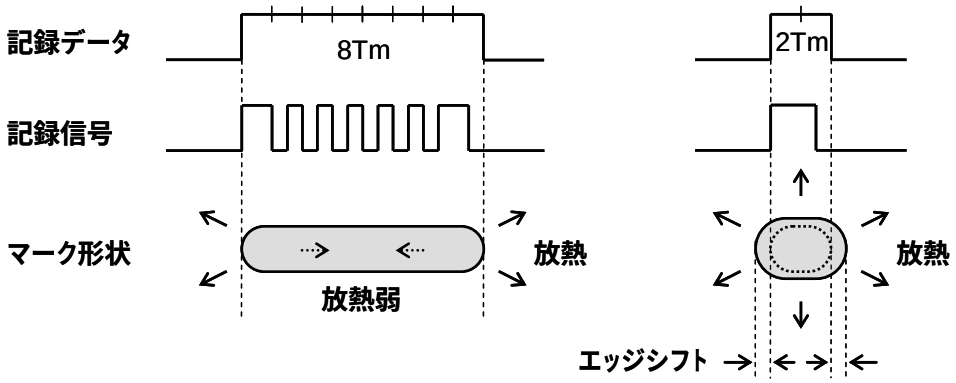


図 4.9 短マークの熱非線形に起因するエッジシフトの発生

短スペースの熱干渉（図 4.10）：

孤立スペースに着目したエッジシフトはマーク始端と終端で異なる挙動をする。図 4.8 の(3)は、2Ts 直前のマーク終端エッジは、マークが短くなる方向に大きくシフトしているが、8Ts～3Ts 直前ではエッジシフトが小さいことを示している。この理由は、2Ts が狭いので、冷却中のマーク終端エッジに、直後のマーク始端の記録熱が記録膜を通じて伝わり、そのため、徐冷となりマーク終端のアモルファス形成が不足するからと考えられる。一方、図 4.8 の(4)は、2Ts 直後のマーク始端エッジは、殆どエッジシフトしていないことを示している。この理由は、2Ts 直後のマーク始端エッジは、直前のマーク終端の記録熱が伝わり到達温度が上昇するが、冷却時には殆ど影響が治まっているからと考えられる。即ち、短スペースの記録は、スペース直前のマーク終端の冷却を緩和する熱干渉がおこり、エッジシフトが発生すると考えられる。

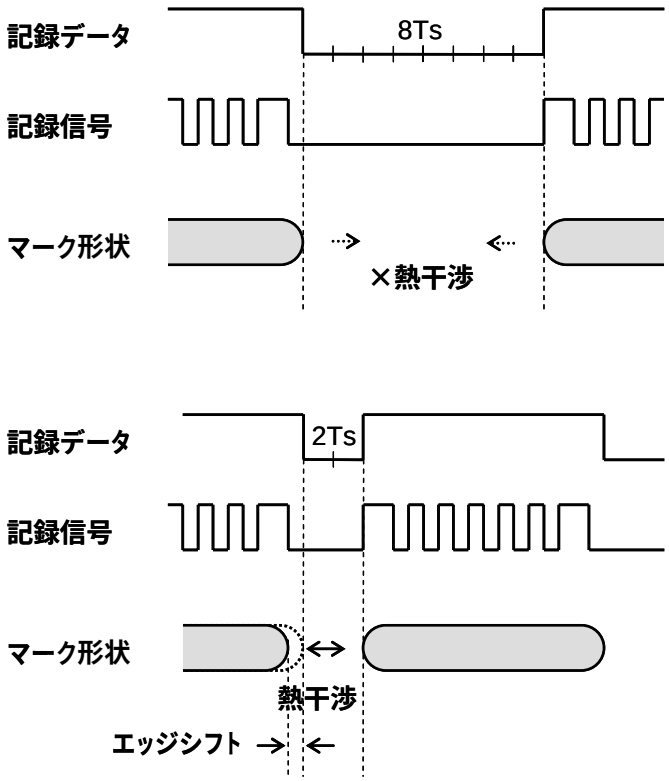


図 4.10　短スペースの熱干渉に起因するエッジシフトの発生

4.2.2　記録補償の方法と検証

以上の孤立マーク／孤立スペース信号を用いた解析を通して、エッジジシフトが発生するデータパタンが特定でき、その方向と大きさを予め知ることができる。ということは、記録する時に、マルチパルス位置をエッジシフトが起こる方向と逆向きに補償することによって、エッジシフトを相殺できるはずである。例えば、8Tm を記録するときの終端パルスの記録補償について、図 4.11 を用いて説明する。後スペースが 8Ts など十分大きい時は標準の終端パルス条件(a)で記録する。しかし、後スペースが 2Ts であれば、熱干渉により時間的に進む（図では左方向の）エッジシフトが生じることが分かっているので、時間的に遅らせた（図では右方向の）終端パルス条件(b)へ補償して記録すればよいと考えられる。

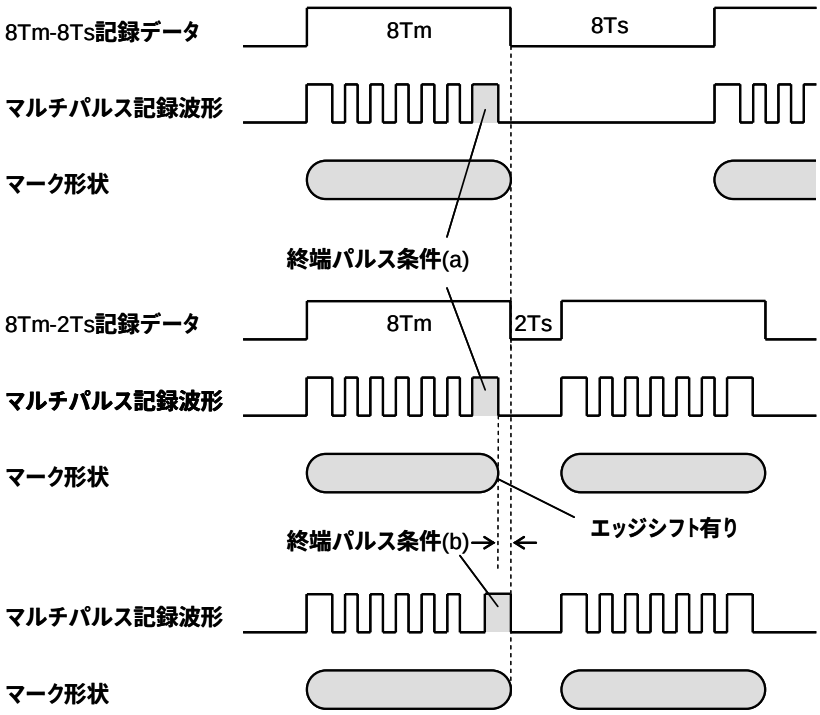


図 4.11　8T マーク終端パルスの記録補償

即ち、記録データからエッジシフトの発生が予測されるパタンを常時検出しながら、正しいエッジ位置に記録できるように、適応的にその補正量を設定するライトストラテジ「パタン適応型記録補償方式[4)]」を提案する。図 4.12 に示すように、(1,7)RLL データでは、前スペース長、自己マーク長、後スペース長に着目すると、マーク始端エッジを含むデータパタンは、前スペース長が 2T～8T の 7 種類、自己マーク長が 2T～8T の 7 種類、組み合わせは 49 パタン存在する。同様に、マーク終端エッジを含むデータパタンとして、自己マーク長が 7 種類、後ろスペース長が 7 種類の 49 パタンある。従って、記録補償条件は、7×7=49 の始端パルス条件と 7×7=49 の終端パルス条件の 2 次元テーブルとなる。この中でエッジシフトが顕著に発生するのは、図中グレーで示す 2T、3T に関連する 8 種類 24 パタンである。残り 25 パタンは 4T～8T だけに関連するパタンであり、エッジシフトが小さいので区別する必要がない。従って、記録パルス条件のテーブルは簡略化することができ、3×3=9 のデータパタンに対応した始端パルス条件と終端パルス条件でよい。なお、単一パルスで記録する 2T マークの場合、始端パルス条件と終端パルス条件とは、単一パルスの前エッジ条件と後ろエッジ条件のことである。

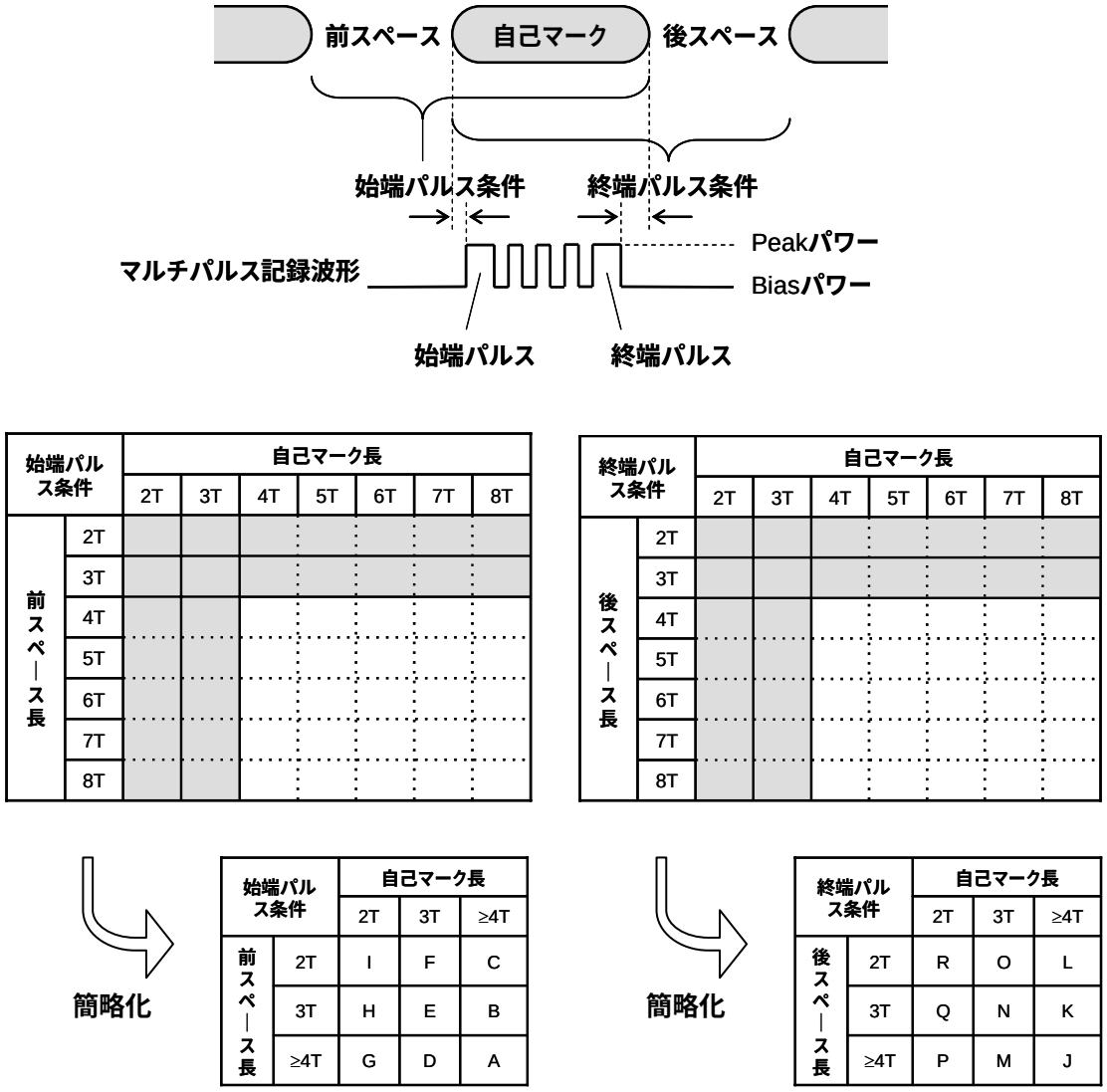


図 4.12 (1,7)RLL マークエッジ記録のマルチパルス記録波形と記録補償条件

図 4.13 にパタン適応型記録補償回路 [4] のブロック図を示す。データ入力に応じて、始端パルスと中間パルスと終端パルスを別々に発生し、始端パルスと終端パルスはプログラマブルディレイラインで遅延させてから、3 つの信号を合成してマルチパルス記録信号を得る。マークスペースエッジパタン検出部において、データ中のエッジシフトが発生するパタンを検出しセレクト信号を発生する。常に変化する記録データに対して、ディレイラインの設定値をリアルタイムで切り替えることにより、始端パルスと終端パルスの位置を適応的に微調整しながら記録信号を生成する。なお、ディレイラインの制御精度は、エッジシフトの残留誤差を抑えるために、記録クロック T の 1/16～1/32 程度の時間間隔が適当と考えられる。

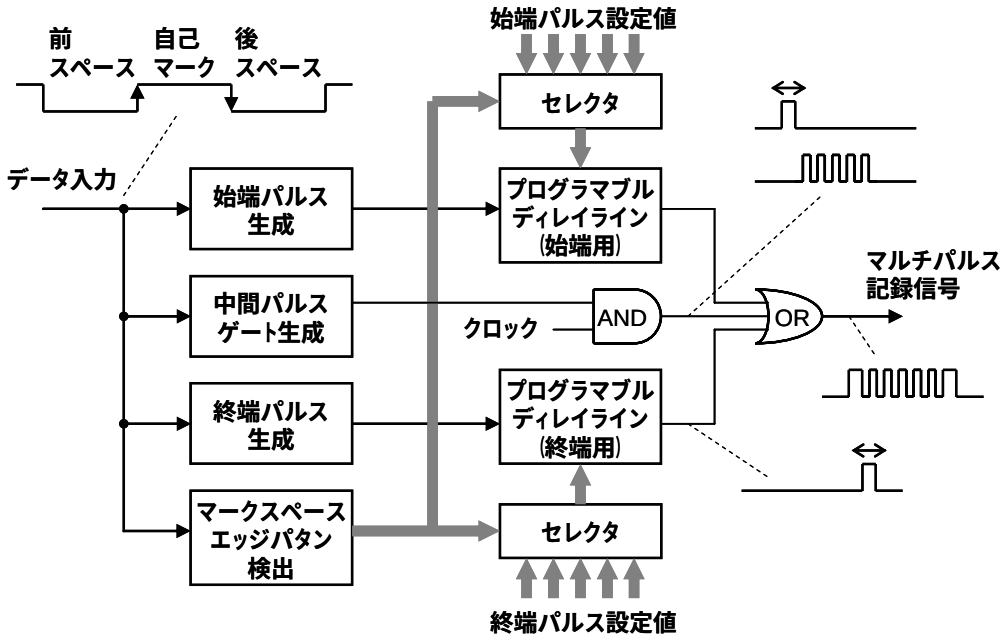


図 4.13　パタン適応型記録補償回路のブロック図

本提案のパタン適応型記録補償方式の有効性を 4.2.1 節と同じ実験条件で検証した。(1,7)RLL 変調された記録データから、始端パルス部（1.0T 幅）と中間部分（0.5T 幅バースト状）と終端パルス部（1.0T 幅）を別々に発生し、始端パルスと終端パルスを 1ns タップのプログラマブルディレイラインで遅延させた。記録クロック周波数が 47.51MHz で周期 T=21.1ns であるので、1ns タップのディレイラインを用いた場合、T に対し約 5%のエッジ調整精度を見込む。以下の説明で、パルス条件 A～J は図 4.12 の 3×3 の表に対応している。

まず、8Tm-8Ts 信号を記録再生したマーク長とスペース長の duty 比が同じになる様に、始端パルス条件 A と終端パルス条件 J の値を決定した。これが 4T～8T の標準的な記録補償条件となる。次に、図 4.7 の孤立マーク／孤立スペーステストパタンを用いて、再生 2 値化信号のエッジシフトがなくなるように、マーク始端エッジ 8Ts-2Tm, 8Ts-3Tm, 3Ts-8Tm, 2Ts-8Tm の各始端パルス条件 G, D, B, C を、マーク終端エッジ 8Tm-2Ts, 8Tm-3Ts, 3Tm-8Ts, 2Tm-8Ts の各終端パルス条件 L, K, M, P を決定した。更に、マーク始端エッジ 3Ts-3Tm, 3Ts-2Tm, 2Ts-3Tm, 2Ts-2Tm の各始端パルス条件 E, H, F, I と、マーク終端エッジ 3Tm-3Ts, 3Tm-2Ts, 2Tm-3Ts, 2Tm-2Ts の各終端パルス条件 N, Q, O, R は次の関係式で求めた。

始端パルス条件：　I =C+A-G,　F=C+A-D,　H=B+A-G,　E=B+A-D　　（式 4.1）

終端パルス条件：　R=L+J-P,　O=L+J-M,　Q=K+J-P,　N=K+J-M　　（式 4.2）

以上の記録補償を行った孤立マークパタンおよび孤立スペースパタンのエッジシフトの測定結果を図 4.14 に示す。2T～8T の全てのマーク長、スペース長で期待値に対するずれは十分小さくなった。次に、ランダムデータを記録再生したアイパタンを図 4.15 に、TIA によるジッタ分布を図 4.16 に示す。アイパタン波形はきれいに重なって観測され、また、ジッタ分布も幅が細く正規分布に近い良好な結果となった。本提案を適用前の図 4.8、図 4.5、図 4,6 と比較すると、エッジシフト抑圧効果が極めて良好であることが分かる。

本方式の特徴は、相変化光ディスクの様なヒートモード記録で問題となるエッジシフトを、記録信号処理により解消する点である。即ち、メディアとして熱干渉を抑える必要性が無く、メディア設計の自由度が高い。また、本検討は、波長λ=785nm、対物レンズ NA=0.55 の光学系を用いた原理確認であるが、マークが小さいλ＝650nm、NA＝0.60 の赤色レーザ光学系、および、λ=405nm、NA=0.85 の青色レーザ光学系でも実施効果が期待できる。

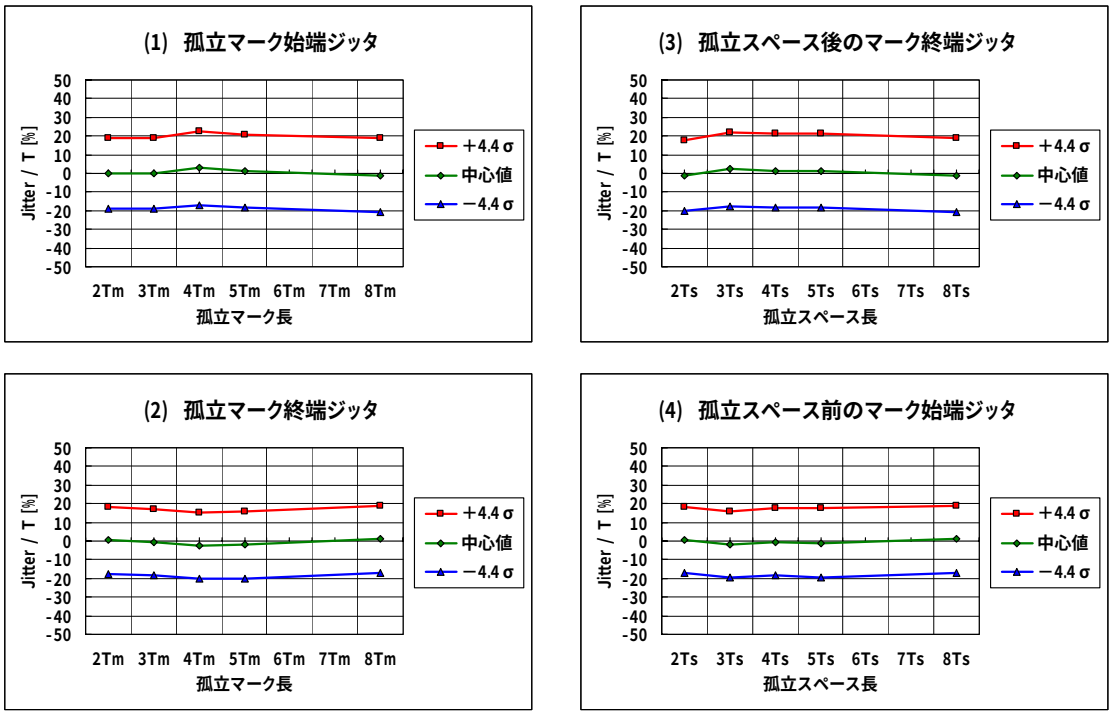
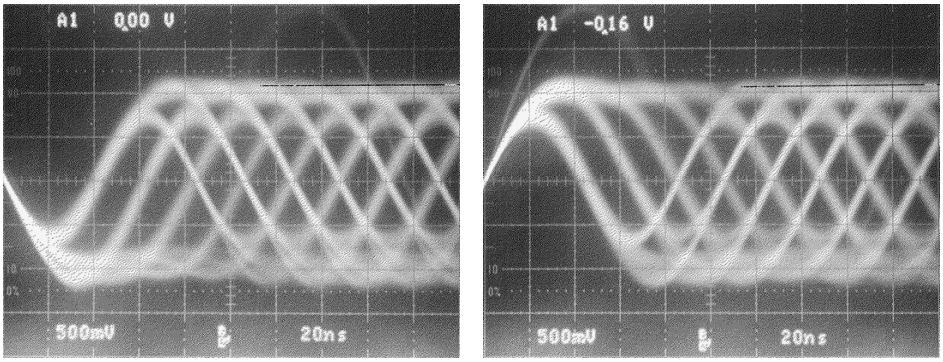
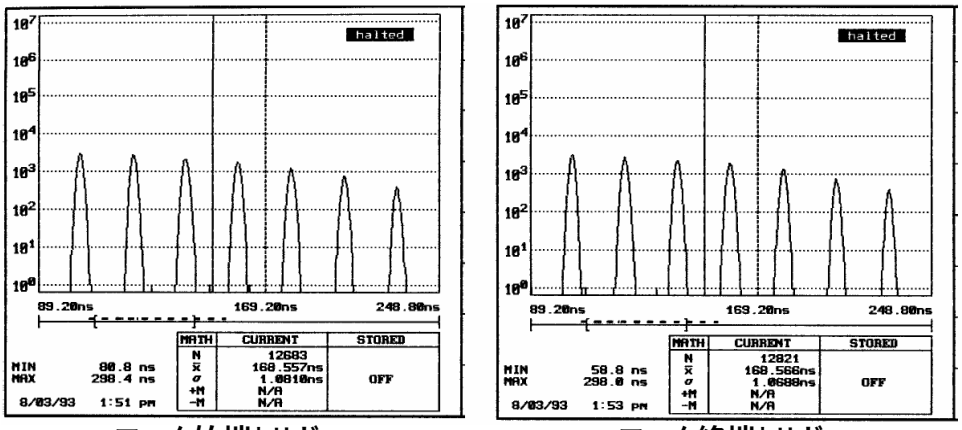


図 4.14 孤立マークパタン･孤立スペースパタン記録再生のエッジシフト



マーク始端トリガ　　マーク終端トリガ

図 4.15　パタン適応型記録補償による再生アイパタン



マーク始端トリガ　　マーク終端トリガ

図 4.16　パタン適応型記録補償による再生ジッタ分布

4.2.3　4.7GB DVD-RAM への適用

波長λ=650nm、NA=0.60 の光学系と、トラックピッチ Tp=0.615μm、相変化記録膜を有するランド&グルーブディスクを用い、線速度 Lv=8.2m/s、クロック周期 T=17.1ns の記録条件で、パタン適応型記録補償方式による高密度化の検証を行った。本条件は 4.7GB DVD-RAM[5] の記録条件に相当する。用いたサンプルメディアの構成を図 4.17 に示す。図 4.18 に示すように、記録マルチパルスは、始端パルスと中間パルス、終端パルスで構成し、始端パルス条件を Tsfp、終端パルスを条件 Telp とする。記録パワーは、Peak と Bias の 2 値とする。前節の記録条件よりも高密度なため、マークパタンに及ぼす熱干渉が相対的に広範囲となるので、記録補償パラメータを 3×3×2 の 18 種から 4×4×2 の 32 種に拡張した。パラメータが増えたが、少ない測定回数で効率よくエッジシフトを調整できるように、表 4.2 に示す複合テス

トパタンを用いた。

まず、6Tm6Ts 信号でアシンメトリが 0～5%内になる補償値を決め、続いて、
ST10 信号を用いて前後 3,4,5Ts の 6Tm の Tsfp/Telp を決定（基準エッジからの TIA）、
ST11 信号を用いて前後 3,4,5Tm の 6Ts の Tsfp/Telp を決定（基準エッジからの TIA）、
ST12 信号を用いて前後 3,4,5Ts の 5Tm の Tsfp/Telp を決定（基準エッジからの TIA）、
ST13 信号を用いて前後 3,4,5Ts の 4Tm の Tsfp/Telp を決定（基準エッジからの TIA）、
ST14 信号を用いて前後 3,4,5Ts の 3Tm の Tsfp/Telp を決定（基準エッジからの TIA）した。

表 4.3 に、再生エッジシフトが±1ns 以内となるように調整した 32 個の記録補償パラメータを示す。ランダム信号を記録して得られたアイパタンとジッタ値を図 4.19 に示す。各エッジが綺麗に重なってアイが開いている。Data to Clock ジッタ値はσ/T=9%未満の良好な値が得られた。波長λ=650nm、NA=0.60 の光学系による 4.7GB DVD-RAM の高密度記録条件においても、パタン適応型記録補償方式の有効性を確認した。

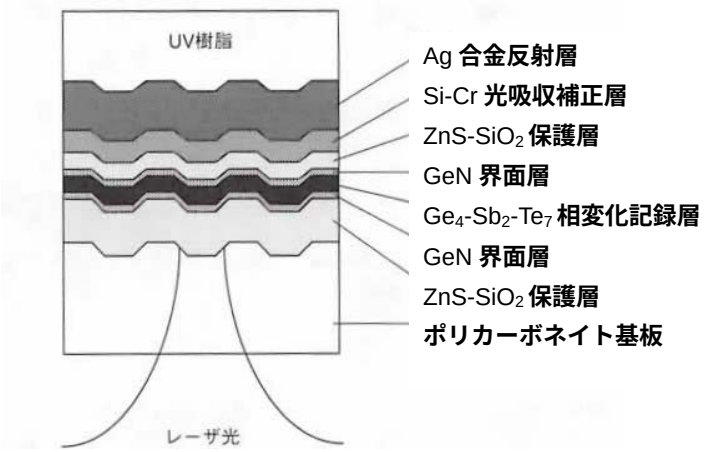
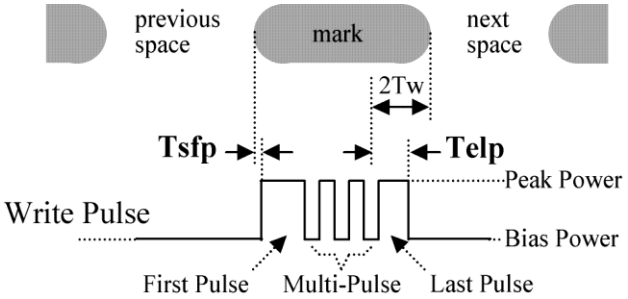


図 4.17　4.7GB DVD-RAM サンプルメディア積層構成（断面図）



始端パルス条件		自己マーク長			
		3T	4T	5T	≥6T
前スペース長	3T				
	4T				
	5T				
	≥6T				

終端パルス条件		自己マーク長			
		3T	4T	5T	≥6T
後スペース長	3T				
	4T				
	5T				
	≥6T				

図 4.18　4×4×2 の記録補償パラメータ

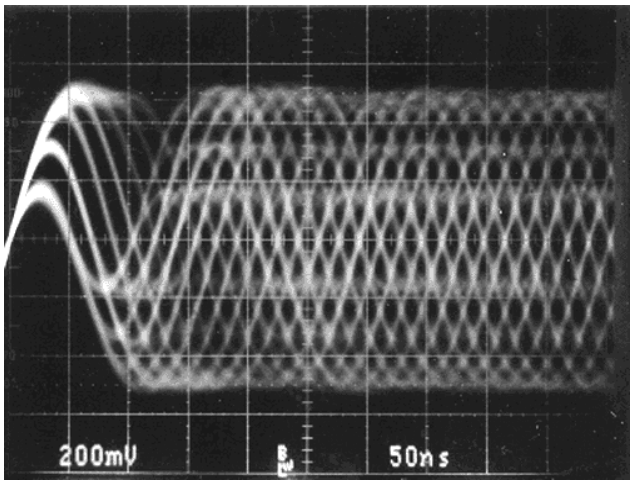
表 4.2　複合テストパタン

信号名	繰り返し信号パタン (#は基準エッジを表す)	調整するマークエッジ	測定間隔
6Tm6Ts	6Tm#6Ts#	6Ts-6Tmマーク始端、6Tm-6Tsマーク終端 (アシンメトリ調整)	6T
ST10	6Tm#6Ts-**6Tm-5Ts-6Tm**-6Ts#6Tm-7Ts- 6Tm#6Ts-**6Tm-4Ts-6Tm**-6Ts#6Tm-8Ts- 6Tm#6Ts-**6Tm-3Ts-6Tm**-6Ts#6Tm-9Ts	6Tm-5Tsマーク終端、5Ts-6Tmマーク始端 6Tm-4Tsマーク終端、4Ts-6Tmマーク始端 6Tm-3Ts マーク終端、3Ts-6Tmマーク始端	11T 10T 9T
ST11	6Ts#6Tm-**6Ts-5Tm-6Ts**-6Tm#6Ts-7Tm- 6Ts#6Tm-**6Ts-4Tm-6Ts**-6Tm#6Ts-8Tm- 6Ts#6Tm-**6Ts-3Tm-6Ts**-6Tm#6Ts-9Tm	6Ts-5Tmマーク始端、5Tm-6Tsマーク終端 6Ts-4Tmマーク始端、4Tm-6Tsマーク終端 6Ts-3Tmマーク始端、3Tm-6Tsマーク終端	11T 10T 9T
ST12	#8Tm-**5Ts-5Tm**-9Ts-**5Tm-5Ts**-8Tm#7Ts- #8Tm-**4Ts-5Tm**-8Ts-**5Tm-4Ts**-8Tm#8Ts- #8Tm-**3Ts-5Tm**-7Ts-**5Tm-3Ts**-8Tm#9Ts	5Ts-5Tmマーク始端、5Tm-5Tsマーク終端 4Ts-5Tmマーク始端、5Tm-4Tsマーク終端 3Ts-5Tmマーク始端、5Tm-3Tsマーク終端	13T 12T 11T
ST13	#8Tm-**5Ts-4Tm**- 6Ts- **4Tm-5Ts**-8Tm# 8Ts- #8Tm-**4Ts-4Tm**- 6Ts- **4Tm-4Ts**-8Tm#10Ts- #8Tm-**3Ts-4Tm**-10Ts-**4Tm-3Ts**-8Tm# 8Ts	5Ts-4Tmマーク始端、4Tm-5Tsマーク終端 4Ts-4Tmマーク始端、4Tm-4Tsマーク終端 3Ts-4Tmマーク始端、4Tm-3Tsマーク終端	13T 12T 11T
ST14	#9Tm-**5Ts-3Tm**-8Ts-**3Tm-5Ts**-9Tm#6Ts- #9Tm-**4Ts-3Tm**-8Ts-**3Tm-4Ts**-9Tm#8Ts- #9Tm-**3Ts-3Tm**-8Ts-**3Tm-3Ts**-9Tm#10Ts	5Ts-3Tmマーク始端、3Tm-5Tsマーク終端 4Ts-3Tmマーク始端、3Tm-4Tsマーク終端 3Ts-3Tmマーク始端、3Tm-3Tsマーク終端	14T 13T 12T

表 4.3　エッジシフト調整後の記録補償パラメータ

始端パルス条件 Tsfp [ns]		自己マーク長			
		3T	4T	5T	≥6T
前スペース長	3T	5	3	1	0
	4T	3	2	0	-1
	5T	4	2	0	-1
	≥6T	4	2	0	-1

終端パルス条件 Telp [ns]		自己マーク長			
		3T	4T	5T	≥6T
後スペース長	3T	10	10	11	11
	4T	10	10	11	11
	5T	9	10	10	10
	≥6T	8	9	10	10

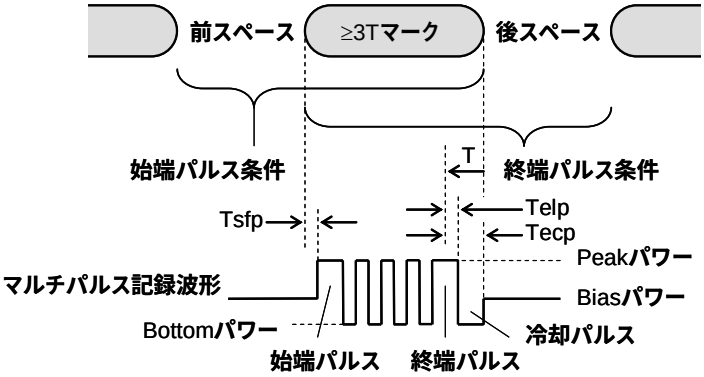


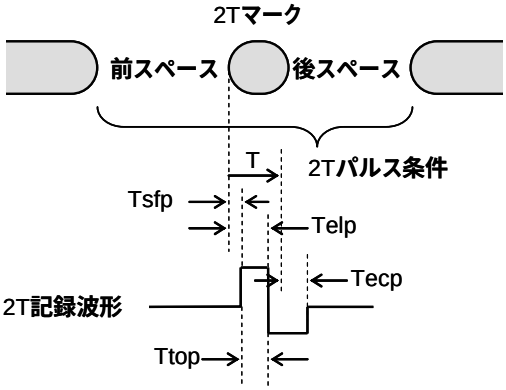
Data to Clock Jitter [%]			
	始端	終端	平均
1回	7.8	7.7	7.8
OW	8.6	8.7	8.7

図 4.19　4.7GB DVD-RAM アイパタンとジッタ

4.2.4　3 層 100GB BD-RE への適用

波長λ=405nm、NA=0.85 の光学系と、トラックピッチ Tp=0.32μm のグルーブ記録方式の 3 層 100GB ディスク、1 層あたり 33.4GB の条件でパタン適応型記録補償方式の検証を行った。前節の 4.7GB DVD-RAM より更に高密度な条件のため、記録補償パラメータを拡張した。図 4.20 に示すとおり、記録補償パラメータを 4×4×2 の 32 種から、今回は(4×4＋4)×2 の 40 種に増やした。3T 以上のマークでは、DVD-RAM と同様の 2 次元補償とするが、最短マークである 2T マークの記録時には、前後のスペース長を含めた 3 次元補償とした [6)]。





始端パルス条件		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
後スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
前スペース長	2T					
	3T					
	4T					
	≥5T					

終端パルス条件		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
前スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
後スペース長	2T					
	3T					
	4T					
	≥5T					

図 4.20　記録補償パラメータの拡張

図 4.21 は試作した書き換え型 3 層相変化光ディスク [7]の構成である。各層共通の実験条件は表 4.4 に示した。ディスク上でのデータチャネルビット長は 56nm と小さい。また、記録補償の分解能は T/32（240ps）に高精度化した。

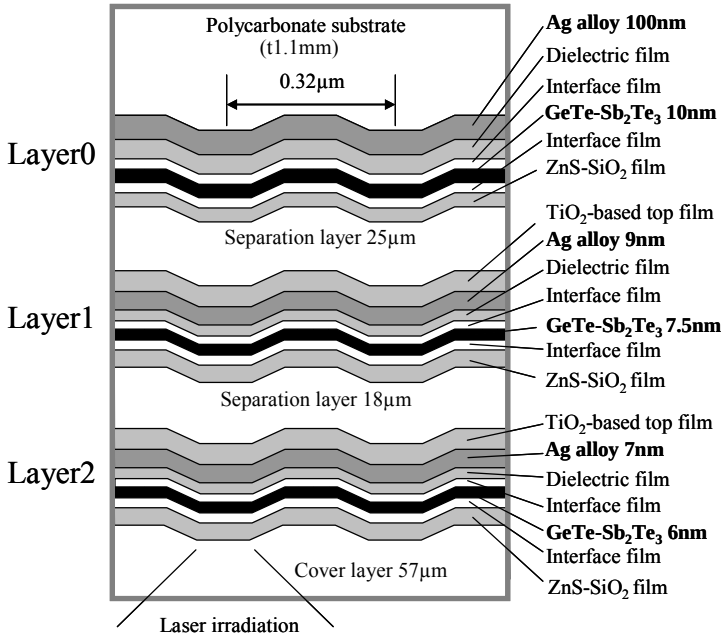


図 4.21　100GB BD-RE メディア積層構成（断面図）

表 4.4　各層共通の実験条件

Recording linear velocity	7.38 m/s
Data channel clock period; T	7.58 ns
Write Strategy Type	N-1
Pulse control accuracy; T/32	240 ps
Data channel bit length on the disc	56 nm
Data capacity per one layer	33.4 GB

拡張したパタン適応型記録補償方式を用いて(1,7)RLL ランダムデータのエッジシフトが無くなるように記録した。得られた各層の記録補償パラメータを表 4.5 に、記録再生信号特性を表 4.6 に示す。各層とも、実用上十分な信号品質として、45%以上の信号変調度、13%以下の i-MLSE 値[8]、2.0×10^{-4} 以下のシンボルエラーレートが得られた。図 4.22 は L2 の記録マークの SEM 像と光スポットサイズの比較模式図である。光スポット径は計算上、半値幅で約φ250nm であるが、相変化記録膜上に回折限界より遙かに小さいφ112nm のナノサイズマークが形成されていることを確認した。

表 4.5 各層の記録補償パラメータ

単位：T/32 (=0.237ns)

Layer0

始端パルス条件(Tsfp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
後スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
前スペース長	2T	4	6	5	5	5
	3T	2	4	4	4	4
	4T	2	4	4	4	4
	≥5T	2	4	4	4	4

終端パルス条件(Telp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
前スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
後スペース長	2T	22	20	17	17	18
	3T	24	22	15	16	16
	4T	24	22	15	16	16
	≥5T	24	22	15	16	16

Layer1

始端パルス条件(Tsfp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
後スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
前スペース長	2T	6	8	1	0	1
	3T	4	6	1	0	1
	4T	4	6	1	0	1
	≥5T	4	6	1	0	1

終端パルス条件(Tecp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
前スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
後スペース長	2T	14	12	11	10	8
	3T	16	14	12	11	10
	4T	16	14	12	11	10
	≥5T	16	14	12	11	10

Layer2

始端パルス条件(Tsfp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
後スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
前スペース長	2T	4	7	1	1	1
	3T	1	4	0	0	0
	4T	1	4	0	0	0
	≥5T	1	4	0	0	0

終端パルス条件(Tecp)		自己マーク長				
		2T		3T	4T	≥ 5T
前スペース		2T	≥ 3T	Don't care		
後スペース長	2T	13	10	11	9	6
	3T	16	13	12	10	7
	4T	16	13	12	10	7
	≥5T	16	13	12	10	7

表 4.6 各層の記録再生信号特性

	Layer0	Layer1	Layer2
変調度	46.1 %	47.6 %	49.5 %
i-MLSE	10.1 %	11.0 %	11.3 %
Symbol Error Rate	5.0E-6	1.0E-4	1.5E-4

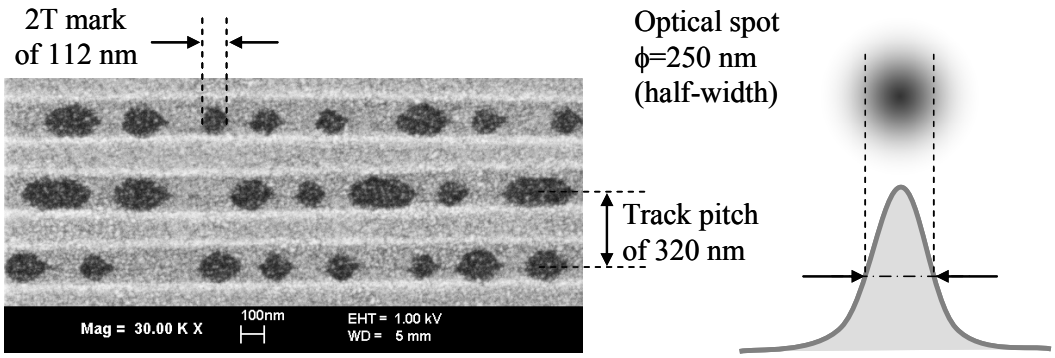


図 4.22　L2 の記録マークの SEM 像と光スポットサイズの比較模式図

ここで、複数の 2T マークを連続して記録する場合の拡張記録補償パラメータに注目 [9]する。2T マークの記録パルス波形を図 4.23 に、各層における 2T の記録条件を表 4.7 に示す。表 4.5 の中から、2T マークの記録補償パラメータ Tsfp を抽出し、相対値で表したものを表 4.8 に示す。

2T マークを記録膜上の正しい位置に形成するための拡張記録補償パラメータは、表 4.8 で対角マス目が逆極性または 0 の対称配置となった。その物理的意味を、記録膜上のマークパタンと記録レーザスポットの関係から考察する。図 4.24(a)は、2Tm-3Ts-2Tm-3Ts-2Tm の前後対称パタン、(b)はその記録レーザパルス、(c)は後ろスペースが小さい 2Tm-3Ts-2Tm-2Ts-2Tm の前後非対称パタン、(d)はその記録レーザパルスを示す。スペースが小さい時、記録膜を通してのマーク間の熱干渉が大きいが、本記録条件はレーザスポットが 2 個のマークにオーバラップするほど高密度である（図 4.22）。従って、熱干渉に加え光干渉を生じる。光干渉が起こる 2Ts の前後では、マークが徐冷となり結晶化が過剰となる。そのためアモルファスマークは図 4.24(c)のようにシュリンクすると考えられる。そこで(f)のようにパルス補償すれば、2T マークは(e)のように正しいエッジ位置に補正されると考えられる。反対に、前スペースが小さい前後非対称パタンの場合は、前記と逆方向のパルス補償が必要となるので、補償パラメータが対角マス目で逆極性となる。一方、2Tm-3Ts-2Tm-3Ts-2Tm や 2Tm-2Ts-2Tm-2Ts-2Tm のような前後対称パタンの時は、光干渉はバランスするので、補償パラメータの相対値が 0 となると考えられる。

また、Layer2 で補償パラメータ絶対値が大きく、Layer0 では Cooling パルスが不要だった理由を以下の様に考える。各層は図 4.21 に示す Ag 合金反射膜を有し、光学的反射だけでなくヒートシンクとして機能している。Layer2 は 7nm と最も薄いので膜の放熱能が低く、記録時の周辺への熱拡散が増加する傾向がある。そのため、L2 では L0、L1 より広範囲の熱干渉

が生じ、表 4.8 のように L2 の補償値が大きくなったと考えられる。更に、L0 は膜厚 100nm と厚いので冷却能が高く Cooling パルスがなくても十分冷却可能なためと考えられる。

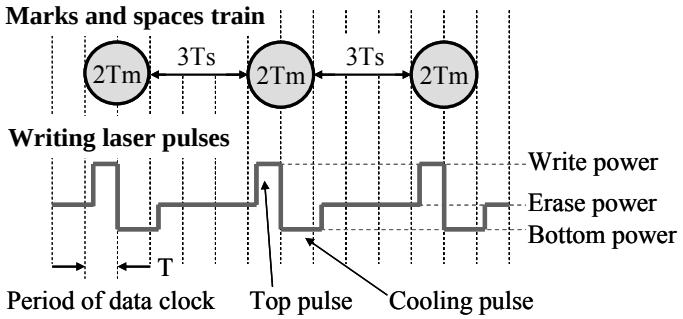


図 4.23　2T マークの記録パルス波形

表 4.7　各層の 2T マークの記録条件

	Layer0	Layer1	Layer2
Top パルス 幅	4.26 ns	2.13 ns	2.13 ns
Cooling パルス幅	none	4.02 ns	3.79 ns
Peak パワー	25.7 mW	23.5 mW	13.6 mW
Bias パワー	9.5 mW	6.3 mW	4.2 mW
Bottom パワー	0.1 mW	0.1 mW	0.1 mW

表 4.8　各層の 2T マークの拡張記録補償パラメータ (相対値)

Tsfp　単位:T/32		Layer0		Layer1		Layer2	
2Tマークの記録補償 相対値		後スペース長		後スペース長		後スペース長	
		2T	≥3T	2T	≥3T	2T	≥3T
前スペース長	2T	0	2	0	2	0	3
	≥3T	-2	0	-2	0	-3	0

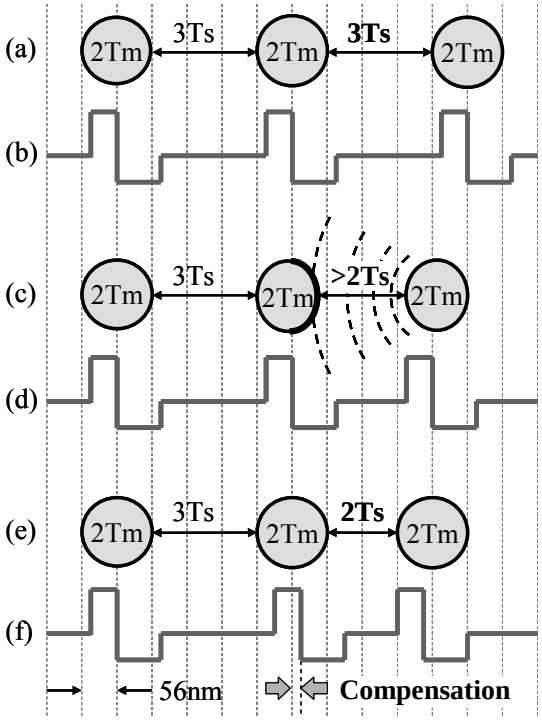


図 4.24　記録膜上のマークパタンと記録レーザパルスの関係

以上述べたように、拡張したパタン適応型記録補償方式を 3 層 100GB 相変化光ディスクに適用することによって、光学スポットサイズより遙かに小さいφ=112nm のマークを正しいエッジ位置に形成できた。その時、2T マークと 2T スペースの記録補償は特徴的な条件となるが、記録パタンとレーザのスポットサイズの関係と記録膜の放熱特性から考えて、マーク記録時に生じる光学的・熱的干渉を記録パルス補償により打ち消す条件として妥当である。

なお、本研究の拡張型のパタン適応型記録補償方式は、3 層 Blu-ray Disc（BD-XL）実現のキーテクノロジーとして規格採用 [10]され、2011 年 4 月に世界初実用化を果たした。

4.3　まとめ

本章では、マークエッジ記録方式を用いて相変化光ディスクに高密度記録する時に有効なライトストラテジとして、パタン適応型記録補償方式を提案し実証した。

波長λ=785nm、NA=0.55 の光学系と、トラックピッチ Tp=1.2μm の書き換え型相変化光ディスクを用いたマークエッジ記録の検討によって、エッジシフト課題の要因を特定し、それを解決する新規なパタン適応型記録補償方式を考案し原理確認した。次に、波長λ=650nm、NA=0.60 の光学系と、トラックピッチ Tp=0.615μm のランド&グルーブディスクを用いた高密度マークエッジ記録にパタン適応型記録補償方式を適用した。その結果、高密度記録で生じる熱干渉を効果的に相殺し、9%未満の良好なジッタ値を得ることができ、4.7GB-DVD-RAM システムを実現した。また、波長λ=405nm、NA=0.85 の光学系と、トラックピッチ Tp=0.32μm のグルーブディスクを用いた多層超高密度記録に拡張したパタン適応型記録補償方式を適用した。その結果、光学スポットサイズより小さいマークを正確な位置に形成し、各層で 13%以下の実用的な i-MLSE 値を得ることができ、3 層 100GB BD-RE システムを実現した。

表 4.9 は、波長・NA と記録密度の関係であり、使用するレーザ波長とレンズ開口数から決まる光ビーム径と、実際に達成されたデータ記録密度を CD-ROM フォーマットと比較する形で列挙した。短波長化と高 NA 化によって光ビーム径が縮小され、それによって原理的に期待される相対密度は、CD-ROM を 1.0 とすると、4.7GB DVD-RAM で 2.6 倍、3 層 100GB-BD-RE で 13.4 倍である。これに対して、本研究のパタン適応型記録補償方式を適用することによって達成した相対密度は、4.7GB DVD-RAM で 5.5 倍、BD-RE で 26.3～35.1 倍と大幅に改善した。本方式により、光学ビーム径縮小効果以上の、顕著な高密度化が達成された。

表 4.9　波長・NA と記録密度の関係

フォーマット	レーザ波長 λ	対物レンズ NA	光ビーム径 R=0.52λ/NA	光ビーム密度 $1/R^2$	相対密度	データ密度	相対密度 (1層あたり)
	μm	-	μm	$1/\mu m^2$	倍	$bit/\mu m^2$	倍
1) CD-ROM	0.785	0.45	0.91	1.22	**1.0**	1.06	**1.0**
2) 本研究の原理検討	0.785	0.55	0.74	1.82	1.5	1.46	1.4
3) 4.7GB DVD-RAM	0.650	0.60	0.56	3.15	**2.6**	5.81	**5.5**
4) 単層25GB BD-RE	0.405	0.85	0.25	16.29	**13.4**	27.90	26.3
5) 2層50GB BD-RE						55.80	
6) 3層100GB BD-RE						111.61	**35.1**

参考文献

1) E. Ohno, K. Nishiuchi, K. Ishibashi, N. Yamada, and N. Akahira: “Multipulse Recording Method for Pulse-Width Modulation Recording on an Erasable Phase Change Optical Disk”, Jpn. J. Appl. Phys. **30** (1991) 677.
2) K. Nishiuchi, N. Akahitra, E. Ohno, and N. Yamada: “Feasibility Study of Ge-Sb-Te Phase-Change Disc Medium for One-Pass Overwrite Digital Audio Recoeding”, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) 653.
3) 古宮成、小石健二、島田敏幸、山田昇、中嶋健、竹村佳也、北浦坦、倉橋章: “相変化ディスク用　高速記録レート・高密度記録方式の検討”, ITE Tech. Rep. VIR93-83 (1993) 7.
4) 古宮成、中嶋健、竹村佳也: “ディスク記録方法およびディスク記録装置”, 特許第 2679596 号 (1997).
5) ISO / IEC 16824: Information Technology-120 mm DVD-Rewritable Disk (DVD-RAM) (1999).
6) A. Nakamura, I. Kobayashi, K. Narumi, T. Takaoka, S. Furumiya, and N. Miyagawa: “33.4 Gbyte/Layer Recording with Adaptive Write Strategy for 100 Gbyte Rewritable Triple-Layer Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 08KG01.
7) T. Nishihara, A. Tsuchino, Y. Tomekawa, H. Kusada, R. Kojima, and N. Yamada: “Rewritable Triple-Layer Phase-Change Optical Disk Providing 100 Gbyte Capacity”, Jpn. J. Appl. Phys. **50** (2011) 062503.
8) J. Shiraishi, S. Kobayashi, H. Miyashita, and Y. Hino: “New Signal Quality Evaluation Method for 33.4GB/Layer BDs”, Tech. Dig. Int. Symp. Optical Memory ’09 (ISOM2009), Tu-F-08 (2009) 74.
9) S. Furumiya and Y. Fujiwara: “Laser Pulse Compensation Applied to Phase-Change Recording Film to Form Nano-Sized Marks”, Journal of Physics: Conference Series **417** (2013) 012050.
10) Blu-ray Disc Association: White Paper of Physical Format Specifications for BD-RE, 3rd edition http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/BD-RE_physical_format_specifications-18325.pdf (2010) 26.

第5章　高速データ記録再生技術の開発

5.1　はじめに

ディジタル HD（High Definition）映像を長時間記録可能な BD システムは、2006 年末に、PC ドライブとビデオレコーダ、そして、2 倍速対応の片面 2 層 50GB の記録メディアの市場供給が開始された。一方、それより先に研究レベルでは、さらなる高速化・多層化を目指した追記型 BD メディア（BD-R）などの検討が学会発表されていた [1,2]。追記型記録メディアの主用途は、大容量の映像コンテンツの保存や HDD（Hard Disc Drive）データのバックアップ等である。しかし、当時の BD-R メディアに関して言えば、記録速度や容量の点で改良が必要であった。例えば、容量 25GB のバックアップ所要時間は、BD2 倍速記録では約 50 分もかかるが、8 倍速化が可能であれば 15 分以下に短縮される。著者らのグループでは、これまで、追記形メディアの記録材料として Te-O-Pd に着目し、同材料を用いた 4 倍速記録 [3]及び 4 層記録 [4]の BD-R メディアの可能性について検討してきた。著者は、この Te-O-Pd 材料を用いた BD-R メディアのさらなる高速化の応用検討を行った。本章では、追記型相変化材料の持つポテンシャルを最大限に引き出す光ディスクドライブの高速データ記録再生技術を確立するために、BD の 8 倍速および 10 倍速の高速記録を実現するライトストラテジを提案し検証する。

5.2　Te-O-Pd 材料の特性

Te-O-Pd 相変化記録材料の記録原理を図 5.1 に、記録マークの TEM 像を図 5.2 に示す。Te-O-Pd は成膜直後では TeO_2 のアモルファスの母材中に Te や Te-Pd の微粒子が分散した複合材料である。ここにレーザを照射すると、粒径の大きな Te、及び Te-Pd の結晶が形成される。これは一方向にだけ進む不可逆な相変化であり、アモルファス部と結晶部で反射率変化が生じるのでこれを再生信号として用いる。また、記録マーク形成時の相変化は、固相中の結晶核の成長ではなく、レーザの照射熱により溶融した部分が結晶化すると考えられている [3]。なお、Te-O-Pd 相変化材料は、Ge-Sb-Te など書き換え型の相変化材料と比べて、記録と未記録に対応するアモルファスと結晶の関係が逆であり、未記録がアモルファス、マークが結晶となる。

本記録材料の特徴は、Pd の結晶化促進効果から結晶マークの高速形成が可能であり、高速データ記録に向く。また、組成比と膜厚調整により高透過率の薄膜設計が容易にできるため、片面 2 層、4 層といった多層メディアが実現できる [4]。更に、無機酸化物としての耐環境特性が優れ、長期保存用途に適する [5]。

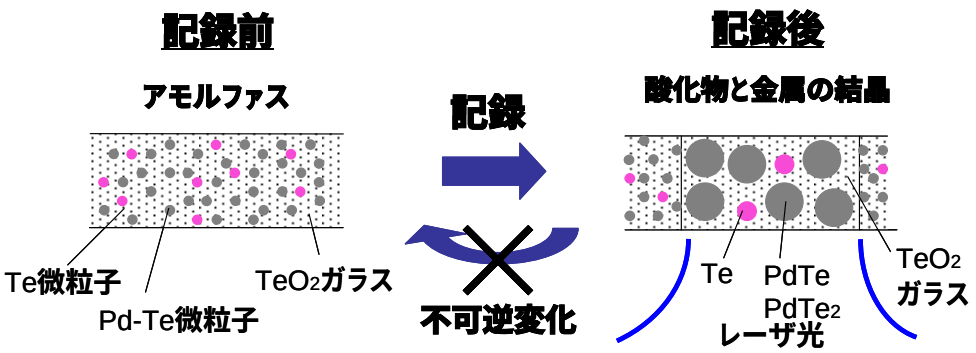


図 5.1 Te-O-Pd 材料の記録原理

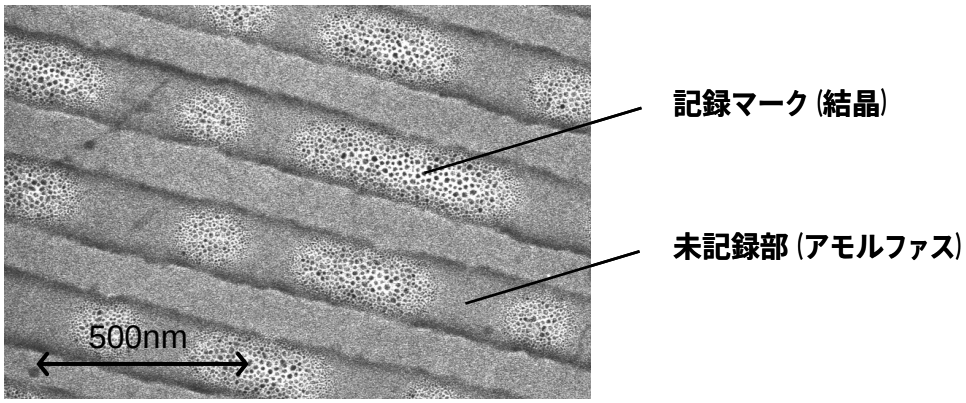


図 5.2 記録マークの TEM 画像 （Te-O-Pd 記録膜）

5.3 L-Shape ライトストラテジ

5.3.1 500Mbps BD-R 高速記録の達成条件

CD-R や DVD-R 以上に、容量の大きい BD-R はデータの高速記録が強く要望されている。例えば、BD8 倍速のチャネルビットレートは 500Mbps を超え、DVD の 20 倍速に相当する。ここで、記録レーザパルスの立ち上がり時間 Tr に着目すると、BD2 倍速で必要とされている Tr=1.5ns から単純にレート比例換算すると、Tr=0.5ns を切る非常に小さな値になり、実現には相当な困難が予想される。本節の検討の目的は、500Mbps 以上のデータ記録を、実現可能な技術の延長線上で達成するために必要な条件を明確にすることである。そのために、まず、高速記録に必要なレーザ応答速度を確かめる手段を用意し、次に、高速向きのライトス

トラテジを導入し記録条件を検討した。

録再特性と書込レーザパルスの立ち上がり時間 Tr の依存関係を評価するために Tr を変化させる実験システムを用意した。図 5.3 のブロック図は実験システムの記録系の信号フローを表している。528Mbps レートの(1,7)RLL 変調のデータを発生させ、これをライトストラテジ信号発生器で 3 値の記録パルス信号に変換する。OPU 上のレーザに最短で直結した LDD（Laser Diode Driver：レーザダイオード駆動回路）により GaN レーザを駆動する。LDD は、レーザを最高 Tr=0.7ns で駆動可能な高速電流駆動アンプである。ここで、レーザの Tr を可変にするために、ライトストラテジ信号発生器と LDD の間に LPF（Low Pass Filter）を挿入して、発光波形を鈍らせる。LPF は図 5.4 に示す、過渡特性に優れる 3 次ベッセルを用いた。カットオフ周波数を 130～400MHz に設定することによって、スルーと併せて、レーザ光の状態で Tr=0.7, 1.0, 1.5, 2.3ns の各立ち上がり時間を約 1.5 倍間隔で実現した。

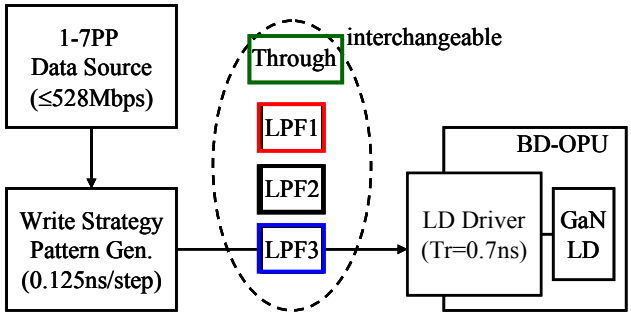
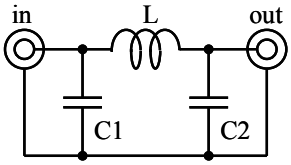


図 5.3　レーザ立ち上がり特性可変の記録実験システム



Type	fc[MHz] of LPF	Tr[ns] @Optical
Through	-	**0.7**
LPF1	400	**1.0**
LPF2	220	**1.5**
LPF3	130	**2.3**

図 5.4　3 次ベッセル LPF とその特性

図 5.5 は、前記レーザ立ち上がり特性可変の実験システムにより BD4 倍速の記録パルス波

形を発生させ、光オシロスコープで実測したものである。横軸は 1ns ステップの時間軸、縦軸が 10%刻みのパワーの相対値を表す。上は 2T マーク、下は 9T マークの記録パルスを、レーザ立ち上がり時間 Tr を変えて重ねて表示した。このように、0.7ns から 2.3ns まで期待通りの立ち上がり特性が得られていることを確認した。4 倍速では、Tr＝2.3ns では速度が遅すぎて波形がピークに到達しないことが分かる。

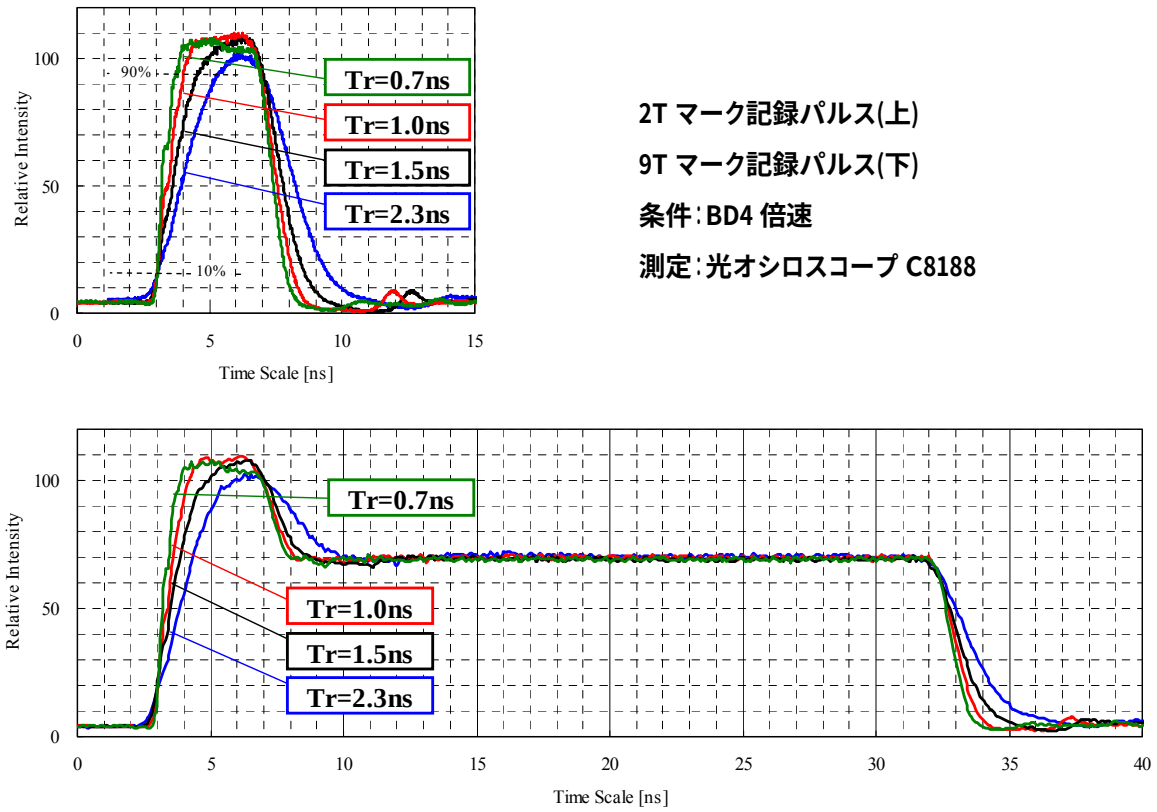


図 5.5　2T と 9T マークの記録信号

次の検討項目はライトストラテジである。マルチパルスでは、500Mbps 以上のパルスが非常に細くなってしまい、レーザの正確な駆動が困難になる。今回提案する L-Shape ライトストラテジについて図 5.6 で説明する。書込みに使用するパワーは 3 値である。2T マークを単一パルスで書くための Pw1 パワー、長マークの先頭部分も同じ Pw1、長マークの後半部分に照射する Pw2 パワー、そして、スペース部分に照射する Ps となる。長マークの記録パルスの形から L-Shape ライトストラテジと名付けた。高速レートでもレーザ電流の変調が容易な波形で、SNR の高い最短マークと、形状歪みの少ない長マークが得られる特徴を有する。

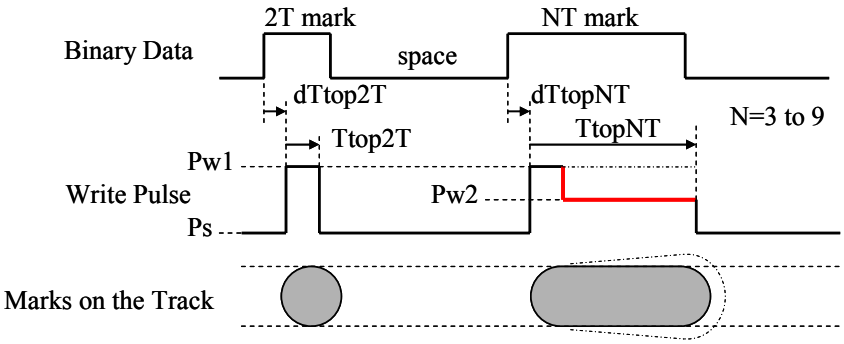


図 5.6 L-Shape ライトストラテジ

L-Shape ライトストラテジの最適化方法について述べる。図 5.7 上の様に、最短マークである 2T は単純なモノパルスで記録する。2T のパラメータは記録パワーPw1 と、パルス幅 Ttop2T だけである。図 5.7 下左は、記録した 2T の再生 CNR を表しており、横軸が記録パワー、縦軸がパルス幅を示している。パワーが高くてパルス幅が大きいほど CNR が上昇する傾向があるが、パルス幅が太すぎると高パワー時に逆に CNR は低く、パワーとパルス幅の 2 次元マップで見たとき、ある最大値を持つ。一方、図 5.7 下右は、同じ記録条件で 2T マークのアシンメトリ、即ち、記録再生された 2T 信号の変調度の適切さを表す。2T が、9T などの長マークの中心レベルに来た時が最適値 0%となる。これは、CNR と異なり、パワーが高くてパルス幅が大きいほど単純上昇する。これら 2 つのマップから最も CNR が高いところでは、アシンメトリが大きくなりすぎることが分かる。アシンメトリが 0%となって、かつ、40dB 以上の CNR が得られ、さらに、記録パワーが極端に高くない条件は、記録パワー9.5mW とパルス幅 1T+0.5ns となる。

次に 9T マークの記録パルスの最適化を述べる。図 5.8 に、9T の記録パルス波形と、Pw1 が 9.5mW の時、Pw2 を 9.5～4.5mW まで変えて記録したときの再生波形を示す。再生波形上側が反射率の高いアモルファス部で、下側が記録によって結晶化し反射率が低下したマーク部である。Pw2 が 9.5mW ではマーク後半が肥大化し、一方、4.5mW まで下げると熱量が足らなくなり後半がしぼむ。この例では 6.0mW が最適であることが分かる。以上のように L-Shape ライトストラテジは後半部分のパワーPw2 により、簡単にマーク形状を最適化できる。

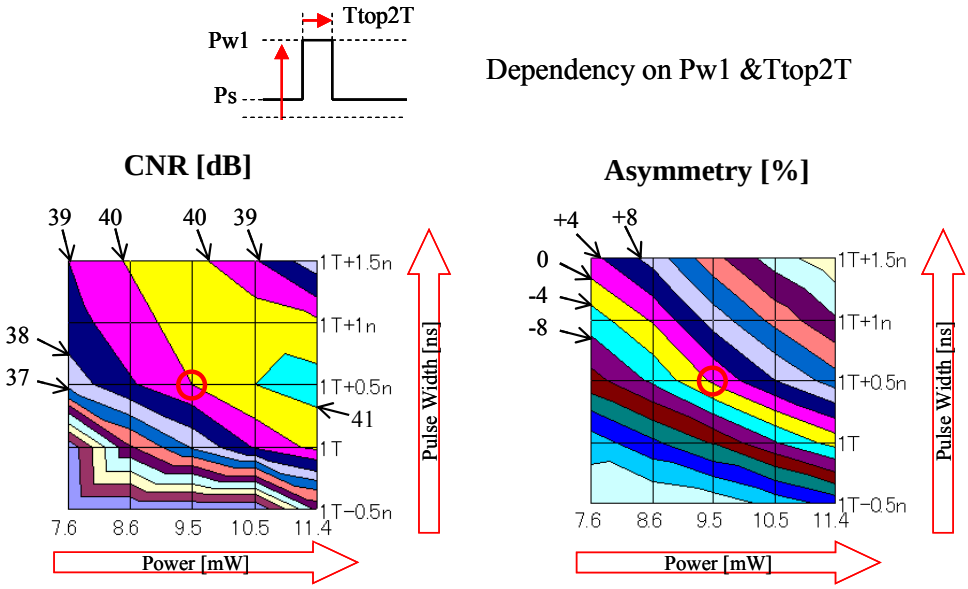


図 5.7　2T マーク記録パルスの条件最適化

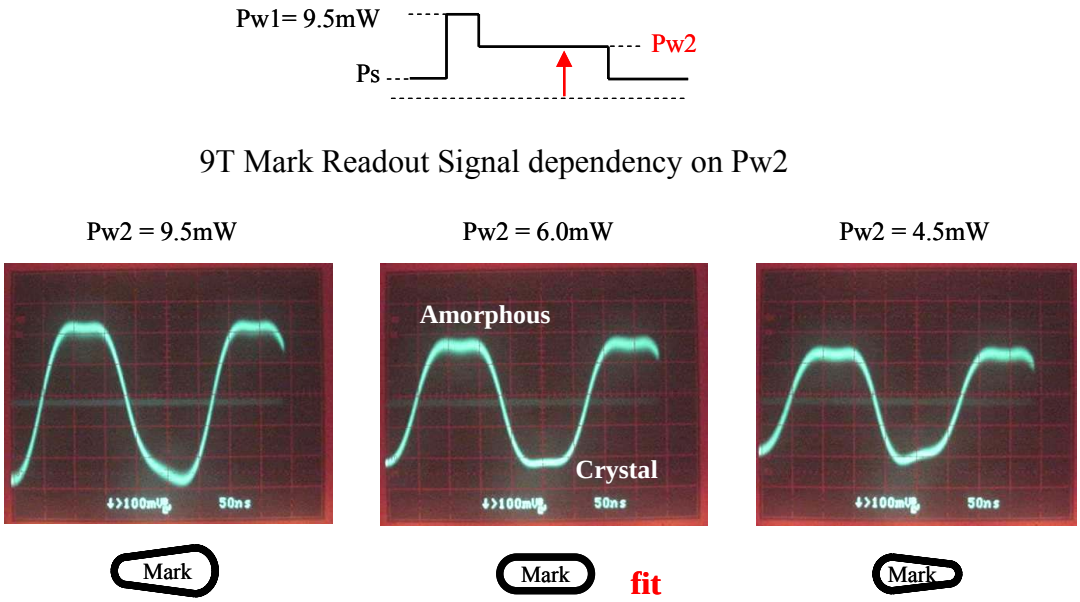


図 5.8　9T マーク記録パルスの条件最適化

5.3.2　記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度依存

500Mbps 以上のデータ記録に必要なレーザ応答速度を明確にするために、記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度依存を測定した。サンプルメディアは、図 5.11 左に示す様に、相変化記録層 Te-O-Pd の両側を誘電体で挟んでアルミ合金の反射膜をスパッタし、BD フォーマットに準拠したカバー層 100μm の単層ディスクを用いた。BD の 8 倍速相当の 528Mbps で 1-7PP 変調のランダム信号を隣接する 5 トラックに記録し、センタートラックを 1 倍速 66Mbps でリミットイコライザを用いて再生しジッタ測定した。表 5.1 に実験条件を示す。

表 5.1　BD フォーマットに準拠した実験条件

Wavelength, NA	405 nm, 0.85	
Track Pitch, Channel Bit Length	320 nm, 74.5 nm	
Channel Code	1-7PP modulation	
Media Type	WO Media with Te-O-Pd Recording Film	
Thickness of Cover Layer	100 um	
Writing Linear Velocity	19.7 m/s	39.4 m/s
Write Channel Clock	264 MHz	528 MHz
Write Pulse Timing Adjustment	0.25 ns/step	0.125 ns/step
Reading Linear Velocity	4.92 m/s	
Read Power	0.35 mW	
Read Equalizer	Limit Equalizer of 7dB Gain	

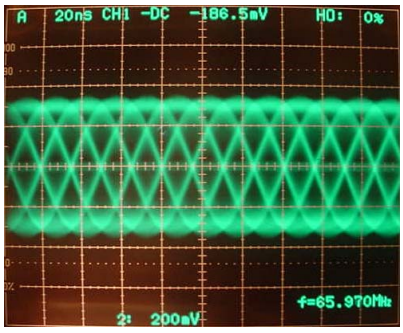
まず、Tr=0.7ns で記録した結果は、図 5.9 に示すとおり、イコライズ後はクリアなアイパタンが得られ、イコライズ前の DC 信号で見たエンベロープからは、十分な信号変調度と適切なアシンメトリを確認した。

次に、図 5.10 に示す様に、横軸に記録パワー、縦軸に再生ジッタの関係をプロットして、レーザの立ち上がり時間 Tr＝0.7, 1.0, 1.5, 2.3ns との関係を調べた。まず、レート 528Mbps、Tr=0.7ns の場合は、記録パワー9.5mW の時、8.3%のボトムジッタが得られた。Tr=1.0ns にした場合は、ボトムジッタがやや悪化した。更に Tr=1.5ns にすると、ジッタと必要パワーが大幅に劣化した。528Mbps には、少なくとも 1ns 以下が必要であることが分かる。

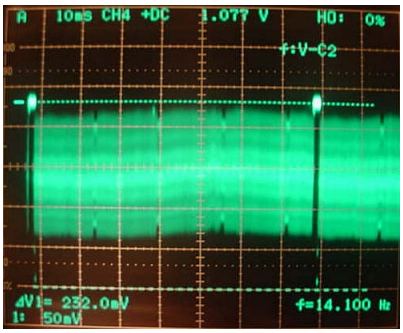
装置の限界で Tr=0.7ns より高速に出来ないので、高速化した場合を推定する手がかりとして、半分のレート 264Mbps でもデータをとった。264Mbps では、Tr=0.7ns の場合は、記録パワー6.0mW の時、6.9%のボトムジッタが得られた。Tr=1.0ns にした場合は、測定誤差以外は全く同じだった。Tr=1.5ns にした場合は、ボトムジッタは殆ど同じで、パワーが少し悪化した。更に Tr=2.3s にすると、ジッタパワーとも大幅に劣化した。

ここでレーザパルスの立ち上がり時間とジッタ改善について考察する。264Mbps の場合は、

Tr が 1.5ns 以下で、殆ど同じボトムジッタが得られている。Tr を 1.0ns より更に小さくしても、少し記録感度が改善するだけで立ち上がり不足の影響は少ない。これを 2 倍レートの 528Mbps に当てはめて考えると、時間半分の Tr 値で同様の特性になると推定できる。即ち、528Mbps では、Tr＝0.75ns でボトムジッタが得られ、もし Tr=0.5ns という超高速駆動が実現したとしても、記録感度が少し改善するのみで、ジッタ改善は小さいと考えられる。



Eye-pattern Signal
(with Limit-EQ)



RF Envelope Signal
(without EQ, DC)

図 5.9　8 倍速記録、1 倍速再生の再生波形

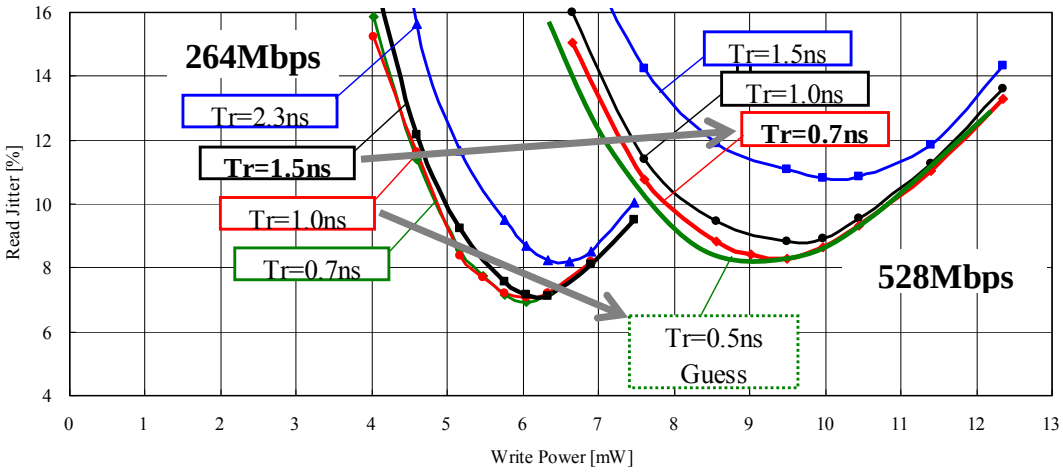


図 5.10　記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度 Tr 依存

つぎに、メディアの膜構成を最適化することでボトムジッタの改善を試みた。4 倍速より 8 倍速でジッタが劣化すると言うことは、記録速度によって記録膜上のマーク形成に違いが生じていることを意味している。高速でのマーク形成をレーザ照射に比例させて精度良く行うためには、記録膜をより急冷の構成にすべきであると推定し、図 5.11 右に示す様に、反射膜をアルミ合金から、放熱効果の高い銀合金に変え、誘電体を薄く変更した。熱の伝達モデルで考えると、記録膜面内の伝導より、深さ方向への放熱を重視した設計である。

この新構成のメディアを用いた場合の記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度依存の結果を図 5.12 に示す。528Mbps のボトムジッタは 7%に改善された。但し、放熱効果を高めたために記録パワーが 11mW と高くなった。狙い通りに、528Mbps と 264Mbps の差が小さくなり、高速でのマーク形成精度が向上したことが分かる。

以上の検討により、レーザ立ち上がり速度 Tr=0.7ns の L-Shape ライトストラテジを、高速向きに設計した Te-O-Pd メディアに適用することにより、BD8 倍速記録を実証した。

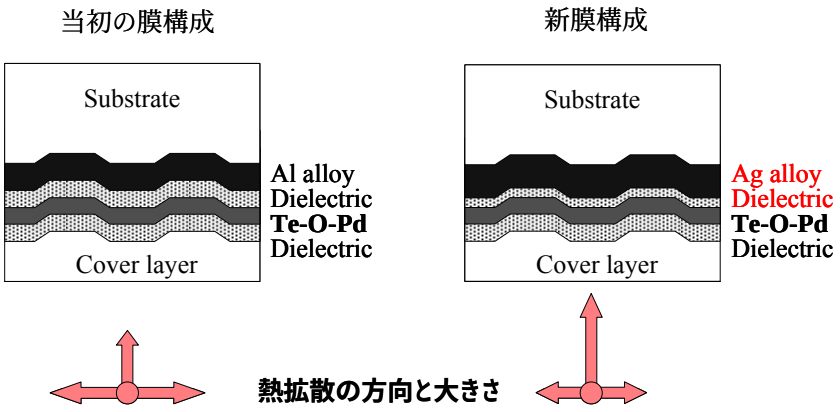


図 5.11　メディア膜構成の改善

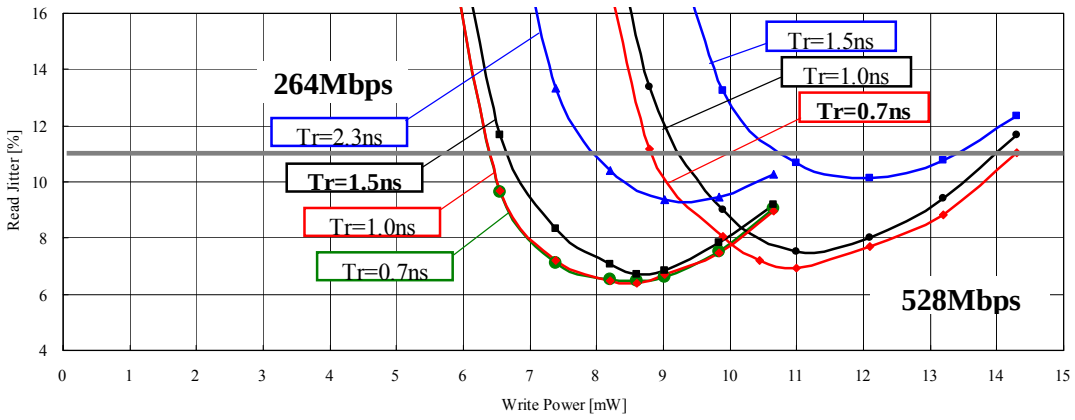


図 5.12　記録再生ジッタ特性のレーザ立ち上がり速度 Tr 依存

5.3.3　2 層 BD-R メディアの 10 倍速記録

2005 年の国際会議 ISOM/ODS'05 では、単層 25GB の BD-R メディアの高速記録の検討報告として、フィリップスの Pasquariello らによる 7 倍速記録 [6)]、パナソニックの著者らによる 8 倍速記録 [7)]、そして、日立製作所の Minemura らによる 9 倍速記録 [8)]が発表された。一方、多層 BD-R メディアについては、これまでの最高速は 4 倍速だった [9,10)]が、その主因は、記録用半導体レーザのパワー不足であった。著者らは、パルス出力 130mW 級の高出力 GaN レーザサンプルを入手し、高効率 OPU に搭載して 2 層 50GB の BD-R メディアの更なる高速記録の検討を行った。

2 層 BD-R メディアの 10 倍速までの記録特性を明らかにするために、シミュレーションと実験の両方で検証を行った。検証に用いた 2 層 BD-R メディアの積層構造を図 5.13 に示す。記録膜は Te-O-Pd 材料であり、2 層メディアの入射側の記録層 L1（Layer1）は、奥側の記録層 L0（Layer0）へレーザ光を透過させるため高透過率設計が必要である。そのため L1 は、L0 より薄い記録膜と反射膜を採用しているため、単層より特性を出すのが難しい。また、評価に用いる記録信号として、速度に対して最も特性差が出やすい 2T マークスペース信号を用いた。図 5.14 に示す様に、2T マークスペースを形成するためのライトストラテジは、ピーク記録パワーPw、クーリングパワーPc、スペースパワーPs の 3 値パルスで構成した。2T マークを記録するパルス幅は、ピーク記録パワーPw 区間が 17/16T で、クーリングパワーPc 区間が 16/16T である。

シミュレーションでは、マーク形状を求めるために薄膜の光熱定数に基づく非定常温度解析モデル [11)]を用いて到達温度マップを求めた。600℃以上に到達する領域が結晶マークになると仮定した。最適記録パワーは、結晶マークの面積が予め想定した比率に達するパワーに決めた。これらシミュレーションの記録条件は後述の実験と等価であると考える。実験では、4 倍速仕様の 2 層 50GB の BD-R メディアサンプルを用い、2T マークスペースパタンを L0 と L1 にそれぞれ記録した。記録レーザパルスの立ち上がり速度は Tr=0.7ns である。記録線速度は 4 倍速の Lv=19.7m/s、6 倍速の 29.5m/s、10 倍速の 49.2m/s の 3 種類とした。シミュレーションと実験の両方においてピーク記録パワーPw とスペースパワーPs のパワー比 Ps/Pw の記録速度依存性を評価した。実験における再生は 1 倍速で行い、測定信号は図 5.15 に示す AC 振幅と DC 振幅とした。

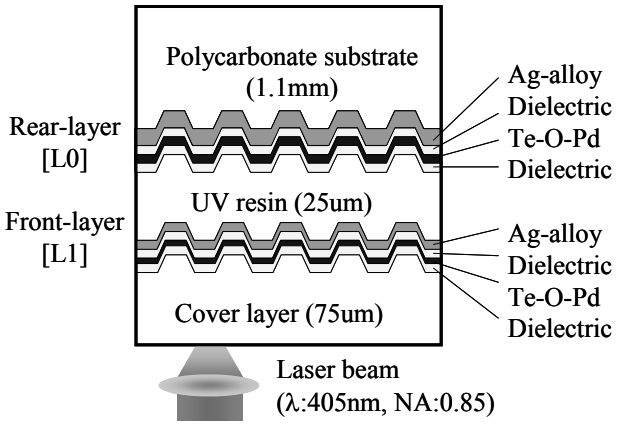


図 5.13　2 層 BD-R メディアの積層構造

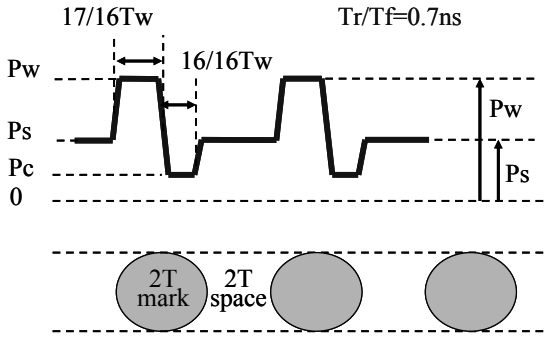


図 5.14　2T マーク記録のライトストラテジ

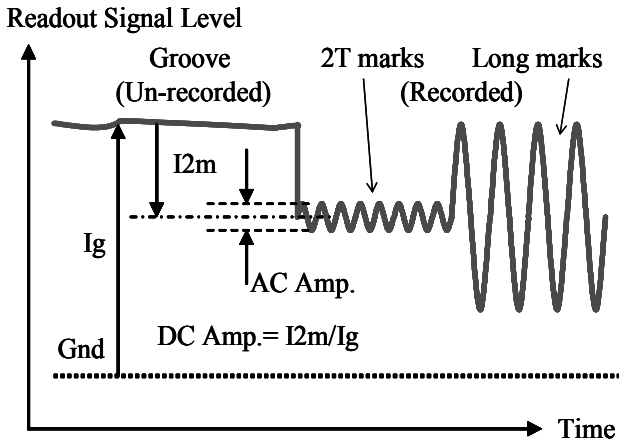


図 5.15　再生信号の DC 振幅、AC 振幅

図 5.16 はシミュレーションによる 10 倍速のマーク形状を表す。パワー比 Ps/Pw=0.3 では、ビームが動く方向にマークが長く幅が細い。マーク間の熱干渉によりスペース部の熱勾配が緩いのでマークがトラック幅方向に成長する前に最適長さに到達しやすいと推定される。この場合、AC 振幅は減る。一方、パワー比 Ps/Pw=0.1 とした場合では、マーク間の熱干渉が抑えられて、比較的マークは丸くなった。

次に、図 5.17 は実験により 2T マークを記録再生した特性を示す。ランダム信号の記録で適切なアシンメトリが得られることを想定して、DC 振幅が所定値に達する最適記録パワーを定義した。その DC 振幅は L0 で 30%、L1 で 25%である。L0、L1 の両方において、DC 振幅は 4、6、10 倍速の各速度とも記録パワーに応じてリニアに増加した。従って、記録で形成される結晶領域は、速度に依存せず、記録膜に注入されるエネルギに比例して増加していると考えられる。

一方、AC 振幅は、速度が上がるほど低下した。AC 振幅の低下量は、Ps/Pw=0.3 の 10 倍速で、4 倍速に対して L1 で-1.5dB、L0 で-2.6dB と大きかった。ところがパワー比を Ps/Pw=0.1 と小さくすると、L1、L0 共に AC 振幅の減衰は-0.8dB に改善した。更に、Ps/Pw=0.1 の 4 倍速と 6 倍速の差は 0.4dB と無視できるほど小さくなった。2T マークスペースの記録条件として、パワー比 Ps/Pw を小さく設定する方が、高速記録時における AC 振幅を大きくでき、記録速度依存を小さくできることが分かった。これらの実験結果は、前記シミュレーションで得られた、パワー比 Ps/Pw に応じた 2T マーク形状の変化と合致する。

以上、シミュレーションと実験によって BD-R メディアの記録パワー比 Ps/Pw が高速記録達成のための重要パラメータであることを特定した。また、Ps/Pw を 0.1 のように小さな値に設定することによって 4 倍速仕様の 2 層 BD-R メディアで 10 倍速もの高速記録が実現可能なことを明らかにした。

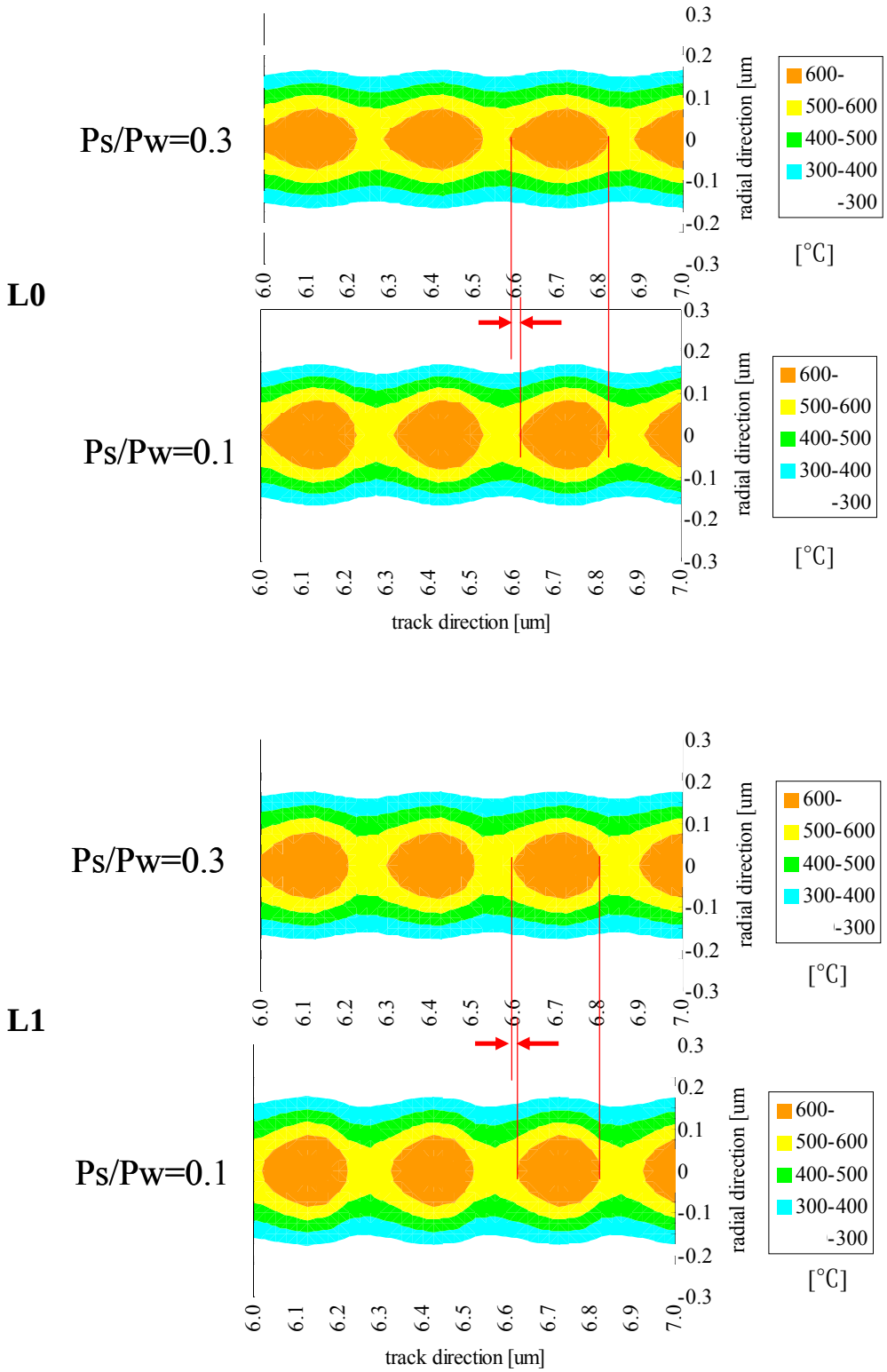


図 5.16　シミュレーションによる記録膜の温度マップ (@10 倍速)

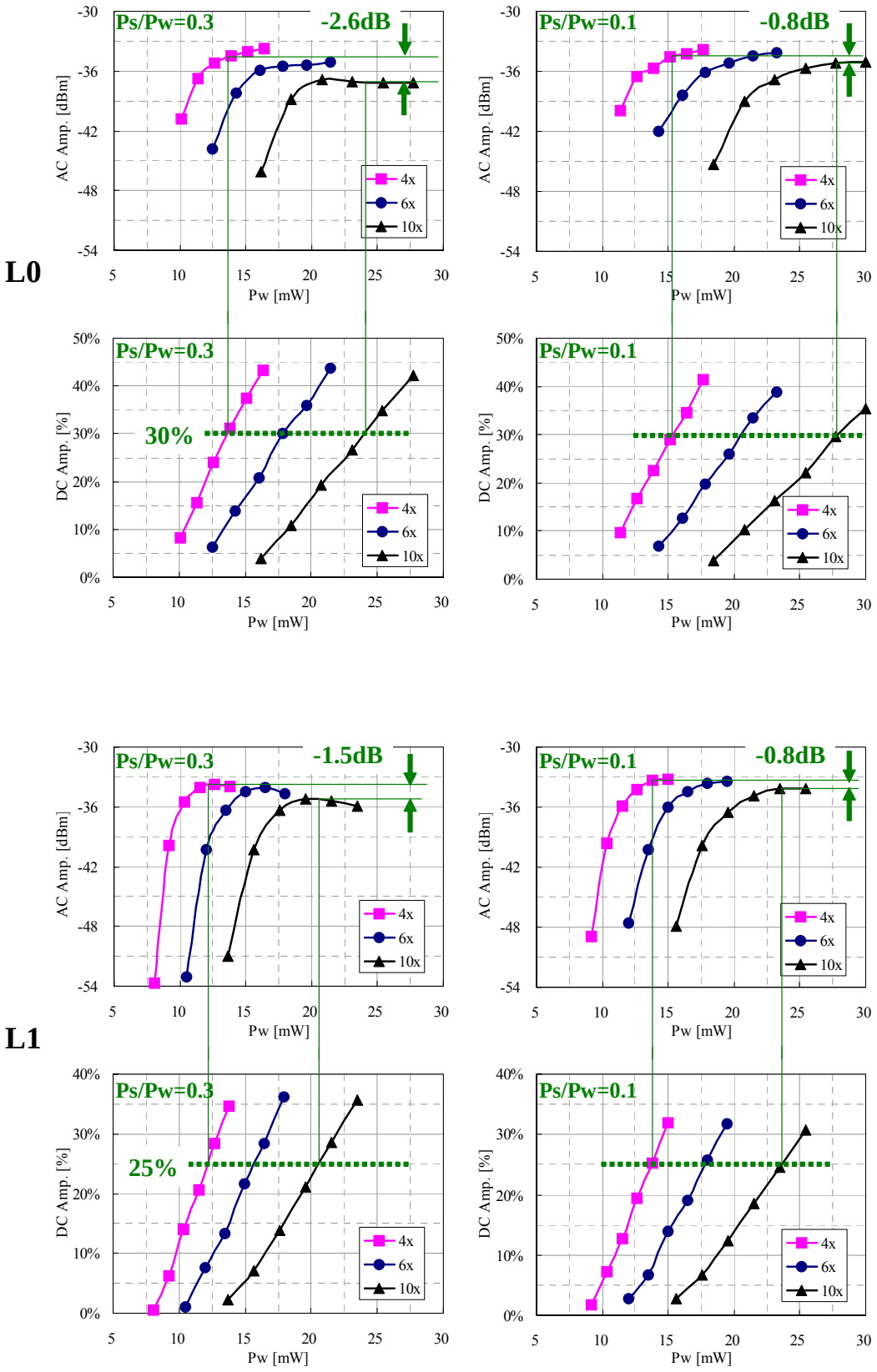


図 5.17　実験による 2T 再生特性の記録線速度依存性

5.4　まとめ

本章では、BD-R メディアの高速化の応用検討を行い、追記型相変化材料 Te-O-Pd の持つポテンシャルを最大限に引き出す光ディスクドライブの高速データ記録再生技術として、L-Shape ライトストラテジを提案し検証した。

単層 BD-R メディアへのチャネルビットレート 500Mbps 以上のデータ記録達成の必要条件を検証した。高速記録に必要なレーザ応答速度、最適なライトストラテジ、高速マーク形成に適したメディア構成を検討した結果、500Mbps を超える BD8 倍速のデータ記録は、立ち上がり時間 Tr=0.7ns のレーザパルスを用いて、L-Shape ライトストラテジを、放熱重視構成の Te-O-Pd 追記型光メディアクに適用することによって実現した。

また、2 層 BD-R メディアの高速記録のポテンシャルを明らかにするために、4、6、10 倍速における 2T マークスペース記録のシミュレーションと実験を実施した。その結果、ライトストラテジの記録パワー比 Ps/Pw（スペースパワー／記録パワー）が高速化の重要パラメータであることを特定し、2 層 BD-R メディアで 4～10 倍速の高速記録を実現する条件を導き出した。

参考文献

1) H. Shingai, T. Kato, H. Inoue, H. Hirata, H. Utsunomiya, H. Chihara, and Y. Tanaka: “The Phase-Change Optical Disc with the Data Recording Rate of 216Mbps”, Proc. SPIE **5069** (2003) 130.
2) R. Tamura, K. Adachi, H. Shirai, and H. Minemura: “216Mbps Write/Read Speed 50GB Phase-Change Write-Once Disk”, Optical Data Storage 2004 (ODS’04), Tech. Dig. (2004) 279.
3) M. Uno, T. Akiyama, H. Kitaura, R. Kojima, K. Nishiuchi and N. Yamada: “Dual-Layer Write-Once Media for 1x-4x-Speed Recording Based on Blu-ray Disc Format”, Proc. SPIE **5069** (2003) 82.
4) H. Kitaura, K. Hisada, K. Narumi, K. Nishiuchi, and N. Yamada: “Multi-Layer Write-Once Media with Te-O-Pd Films Utilizing a Violet Laser”, Proc. SPIE **4342** (2001) 340.
5) N. Miyagawa, H. Kitaura, K. Takahashi, Y. Doi, H. Habuta, S. Furumiya, K. Nishiuchi, and N. Yamada: “Over 500 Years Lifetime Dual-Layer Blu-ray Disc Recordable Based on Te-O-Pd Recording Material”, Proc. SPIE **6282** (2006) 62822F.
6) R. J. M. Vullers, A. E. T. Kuiper, and D. Pasquariello: “High-Speed 7x CuSi-Based Write-Once Blu-ray Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 1219.
7) H. Minemura, K. Watanabe, K. Adachi, and R. Tamura: “High-Speed Write/Read Techniques for Blu-ray Write-Once Discs”, Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage 2005 (ISOM/ODS’05), Tech. Dig. ThB1 (2005).
8) S. Furumiya, K. Takahashi, H. Kitaura, N. Miyagawa, and N. Yamada: “Over-500-Mbps Data Recording on Write-Once Media with L-Shaped Write Strategy”, Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 1223.
9) K. Mishima, D. Yoshitoku, H. Itoh, T. Kikukawa, S. Yamatsu, H. Inoue, T. Komaki, K. Tanaka, and T. Aoi: “150GB, 6-Layer Write-Once Disc for Blu-ray Disc System”, Proc. SPIE **6282** (2006) 62820I.
10) H. Habuta, M. Tomiyama, K. Takahashi, M. Tsukuda, Y. Tomekawa, S. Furumiya, and N. Yamada: “Quadruple-Layer Write-Once Disk for Blue Laser Based on Te–O–Pd Recording Films”, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 7160.
11) K. Narumi: “Thermal Simulations for Development of Rewritable Blu-ray Disc”, 2nd Int. Symp. on Thermal Design and Thermophysical Property for Electronics and Energy (e-Therm 2010), Keynote2, December 15 (2010).

第6章　高信頼データ記録再生技術の開発

6.1　はじめに

前章まで、相変化光ディスクメディアの物理フォーマット、および、光ディスクドライブの高密度・高速データ記録再生技術を提案および検証してきた。しかしながら、光ディスクメディアとドライブが、実験室ではなく実際の市場で使用される状況においては、以下の要因によりデータの記録再生状態に悪影響を及ぼす可能性があることを課題認識しなければならない。

１）大量生産における製品のばらつき
　メディア：同じ規格品であってもメーカの異なるディスク、または、ディスク毎の特性差
　ドライブ：光ピックアップの個体差（光学部品の調整誤差やスポット形状歪など）
２）ディスク表面の汚れ（指紋、ほこり、傷）
３）経時的な特性劣化、温度湿度の影響
　メディア：ディスクチルト（基板の形状歪みによる入射光ビームに対する信号面の傾き）
　ドライブ：サーボオフセット（光ビーム走査時におけるオフトラック、デフォーカス）

更に、ある程度の製造ばらつきや特性差を許容することで生産性と互換性を高め、製品コストを下げることが重要である。また、ドライブは、どのような状態のメディアが挿入されても、常にメディアの最高性能を引き出すこと、メディアは、どのドライブを用いても、データが常に同質に記録され互換がとれることが大切である。従って、前記要因があっても原理的に高信頼性を保つための仕組みをドライブに内蔵すべきと考えた。

本章では、上記の劣化要因をあらかじめ想定し、信号処理によってデータエラーレートを悪化させることなく、常に高信頼のデータ記録再生を実現するために新規開発した種々の仕組みについて述べる。

6.2　記録条件の自動最適化

第 4 章において、相変化光ディスクの高密度マークエッジ記録方法としてパタン適応型記録補償方式を検証した。本方式を実際の光ディスクシステムで運用するには、ｎ×ｍ種類の始端パルス条件と終端パルス条件からなる記録パルスの標準条件を決める必要がある。その方法は、あらかじめ標準的な特性を有する基準メディアを用いて、標準的な特性を有する基準ドライブで求める。記録パルス条件が異なる複数種類のメディアをあらゆるドライブで使用可能とするために、前記記録パルス標準条件を各メディア内に記録しておき、ドライブに

挿入されたとき読み出してドライブの記録条件を設定してからデータを記録すればよい。

ところで、光ディスクドライブを量産した時、使用部品の特性ばらつきや組立ての誤差などで、すべての個々のドライブが同一の特性を有するとは限らない。例えば、光ピックアップは､個々にスポット形状が僅かに異なり､厳密には同じ記録性能が得られない要因となる。温特や経時変化でもその特性は変動する。同様に光ディスクメディアも量産時に、記録膜のスパッタ条件が変動すると、膜厚および膜質が僅かに変化し記録特性のばらつきが発生する要因となる。同一の発光波形で記録しても個々のメディアで常に同じマーク形状が得られるとは限らない。従って、記録パルス標準条件を、特性のばらつく量産メディアとドライブでそのまま使用すると、組み合わせによっては適正な記録再生条件とならない場合があり、互換性の課題が生じる。

本節では、光ディスクメディアおよびドライブのばらつきの影響を低減するために、いかなるメディアとドライブの組み合わせ時にも、ドライブに挿入されたメディア毎に最適な記録パルス条件を求める自動最適化の手法を検討した。ディスク内に予め設けられたドライブテスト用のトラックを用いて条件探査を行うジッタ最小法（JM 法：Jitter Minimizing Method）を提案し検証する。

6.2.1　PLL を用いたエッジシフト検出の原理

記録パルス条件を求めるためには、エッジシフトの測定が必要であり、実験室では測定器 TIA[1)]により録再信号から目的のパルスエッジ間隔だけを抽出し、その精密な時間を測定する。TIA を用いたタイムインタバル測定では、極性を含めて絶対値の検出が可能である。TIA の構成は、水晶発振の正確なクロックで入力パルス幅をカウントする部分と、1 クロック以内の端数時間をそのパルス幅に比例した電圧を出力し A/D 変換する部分とからなり、精密な測定機として大規模なハードウエアを必要とする。従って、TIA 機能をそのままコスト重視の民生用ドライブに搭載するには不向きである。

一方、ドライブに通常搭載されている PLL 回路には位相比較器があり、入力信号パルスと再生クロックの位相誤差信号を生成している。位相誤差パルス幅の平均値を電圧に変換し、ジッタの大きさに相当する信号を出力することは容易である。だたし、パルス幅の絶対値や極性の検出は困難である。そこで、ドライブ既存の回路を用いて、テストパタンと探査方法を新しく工夫することにより、タイムインタバル測定と等価な検出ができるように「ジッタ最小法」を考案した[2,3)]。

図 6.1 に示す光ディスクドライブ内の PLL 回路では、2 値化信号と再生クロックを位相同期するために、位相誤差の積分値が最小となるように VCO（Voltage Controled Oscillator：電圧制御発振器）を閉ループ制御している。このとき位相比較器が出力する UP・DOWN パルスを、2 値化信号の極性により切り替えて LPF 処理することによって、再生信号のマークの始端と終端を区別したジッタ出力を得ることが出来る。

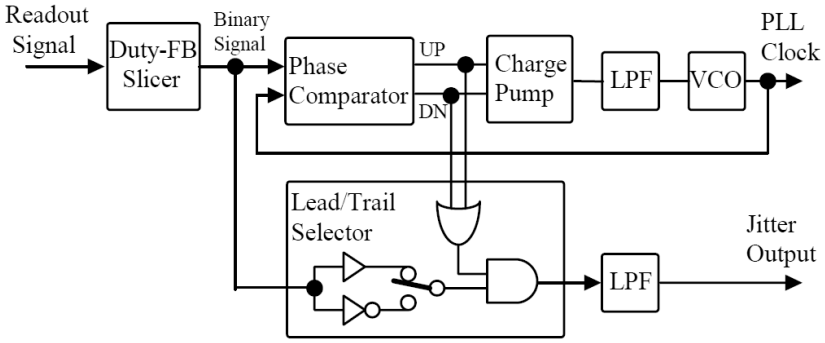


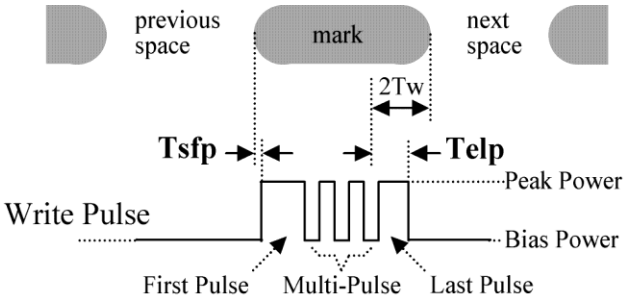
図 6.1 光ディスクドライブ内蔵の PLL 回路へのジッタ検出機能の追加

図 6.2 は、4.7GB DVD-RAM におけるパタン適応型記録補償方式を示す。１個のマークを記録するために、First Pulse と Multi-Pulse と Last Pulse で構成されるレーザパルスを照射する。First Pulse のタイミング Tsfp を前スペース長と自己マーク長で、Last Pulse のタイミング Telp を自己マーク長と後スペース長により変化させる。Tsfp 値は、前スペース長 4 種類と自己マーク長 4 種類の関係で 4x4 の 16 種類、Telp 値も、自己マーク長 4 種類と後スペース長 4 種類の関係で 4x4 の 16 種類ある。

これら 32 個のパラメータを前述のジッタ出力で求めるためのテストパタン（図 6.3）は、以下の条件を満たす必要がある。

①マーク-スペース-マーク-スペースの単純繰り返しパタン
②始端パルス条件 Tsfp 学習用は、被調整エッジ△と基準エッジ▲を含む
　終端パルス条件 Telp 学習用は、被調整エッジ▽と基準エッジ▼を含む
　(※基準エッジ：熱干渉のない≧6Tm,≧6Ts の境界エッジ)
③マーク長合計とスペース長合計を一致（DSV=0）させる

①②条件により前述のジッタ出力から被調整エッジのエッジシフトを高い感度で検出可能であり、③条件により再生時の Duty-FeedBack スライサのレベル安定化を保証することができる。



mark length

previous space length / Tsfp	3m	4m	5m	≥6m
3s	a1	a2	a3	a4
4s	a5	a6	a7	a8
5s	a9	a10	a11	a12
≥6s	a13	a14	a15	a16

mark length

next space length / Telp	3m	4m	5m	≥6m
3s	b1	b2	b3	b4
4s	b5	b6	b7	b8
5s	b9	b10	b11	b12
≥6s	b13	b14	b15	b16

図 6.2　4.7GB DVD-RAM におけるパタン適応型記録補償方式

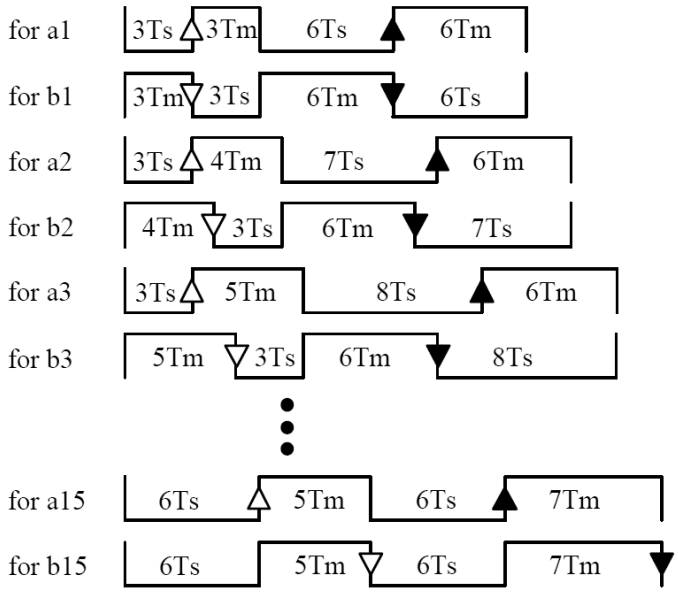


図 6.3　ジッタ最小法におけるテストパタン

6.2.2　ジッタ最小法の最適化アルゴリズム

ジッタ最小法のエッジシフト検出原理について説明する。図 6.4 は、終端パルス条件 Telp5m4s を求める例である。テストパタン 5Tm-4Ts-6Tm-7Ts を用い、ドライブ内蔵のジッタ検出機能でマーク終端ジッタの大きさを測定する。5Tm 終端エッジと基準エッジの関係が丁度クロック単位となって重なった時、合成ジッタが最小となりエッジシフトが無い状態と分かるる。一方、エッジシフトが有る場合はジッタ分布が重ならず合成ジッタが増大する。従って、終端パルス条件 Telp5m4s を順次変えながら記録し、各条件でジッタ値を測定すれば、ジッタ最小となる時のパルス条件が、最適記録パラメータであると判明する。図 6.5 は、Telp5m4s を 1ns ずつ変えて PLL でジッタを測定した結果と、TIA を用いてエッジシフトを実測した結果の比較である。ジッタ最小点とエッジシフトが無い点が一致したことを示している。

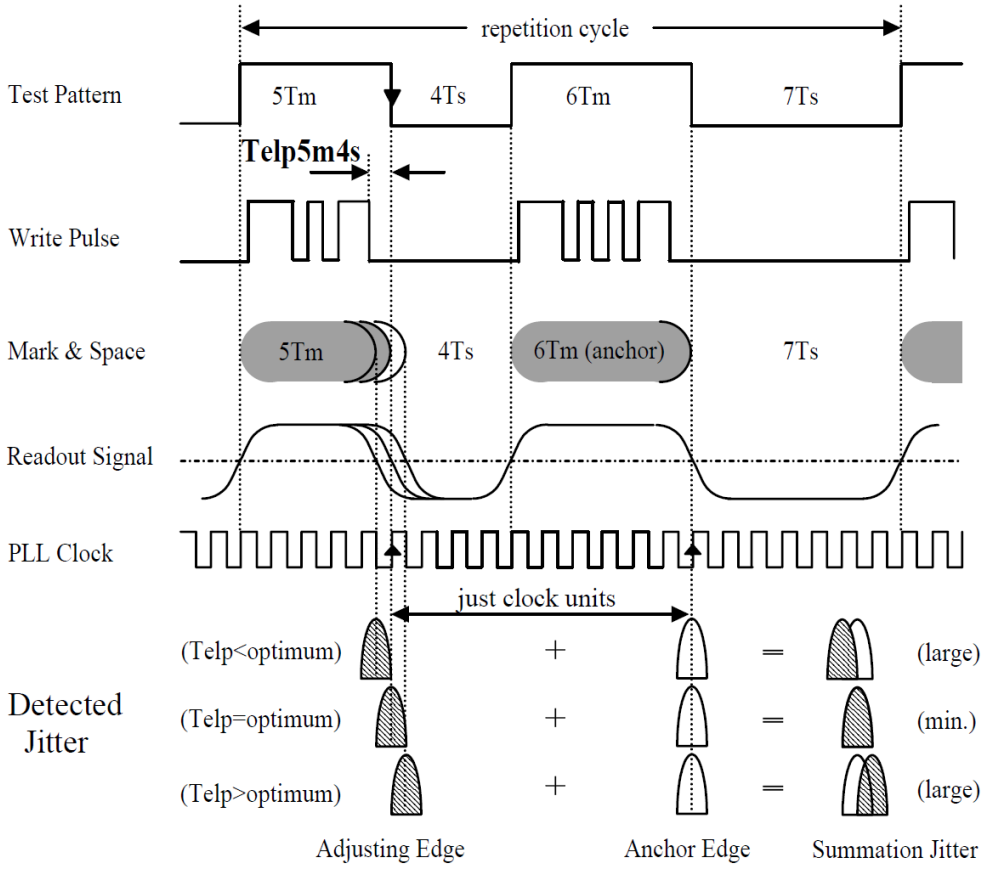


図 6.4　エッジシフトの検出原理

32 個すべてのパルス条件を決める方法について述べる。図 6.6 に示す手順で、始めに、6Tm-6Ts でアシンメトリが 0～5%内になるパルス条件を決める。次に、順次テストパタンを変えながらジッタ最小点の探査により 30 個のパルス条件を決定していく。なお、図示していないが、誤差を少なくするために、予めセクタ検査を行い不良セクタを除き、ランダム信号を下地に記録してトラックを均質化する前処理を行い、4.7GB DVD-RAM のドライブテストゾーン 1 周 25 セクタに最適な効率と精度を両立した 5 条件 5 回繰り返し記録[4)]を実施する。

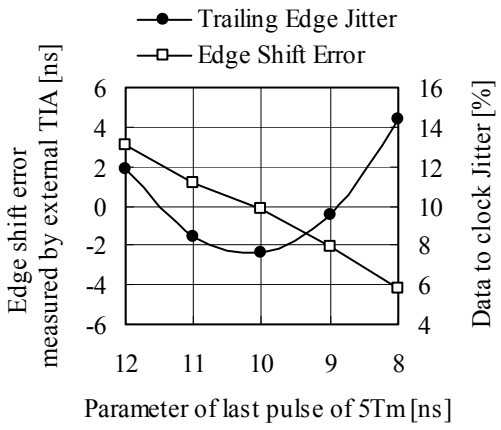


図 6.5 エッジシフトの探索結果

本ジッタ最小法は、ドライブに初めて挿入されたディスクに対して起動時に実行され、結果はディスク内周の DIZ（Disk Identification Zone）に記憶される。2 回目以降は記憶値を使用し、最適化なしで起動時間短縮を図る。全パラメータを最適化した結果として、トータル調整時間 4.8 秒、ドライブでの記録再生ジッタ 8.6%を得た[5)]。また、図 6.7 に示すように、本方式の適用前は、特性下限のメディアと特性下限のドライブの組み合わせにおいて記録再生品質に課題があったが、本方式の導入により、限界同士の組み合わせでも規格値内のジッタが得られるようになった。ジッタ最小法は、小規模ハードウエアを用いて TIA による測定と同等の結果を提供し、量産ディスクとドライブのばらつきに対して、データ記録の信頼性向上と互換性確保を実現した。なお、本方式は、ローコストでドライブの高性能を実現する独自技術として、4.7GB DVD-RAM パナソニック量産ドライブ１号機から搭載されている。

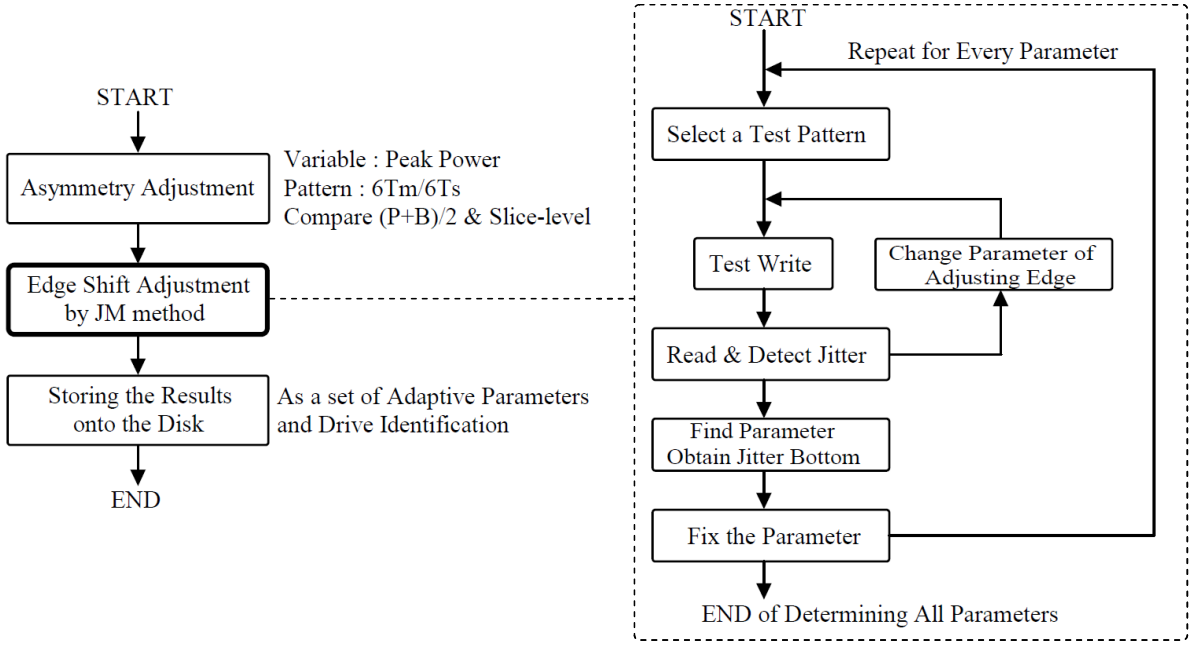


図 6.6　ジッタ最小法実行の手順

ジッタ最小法適用前

録再ジッタ[%]		メディア	
		標準	下限
ドライブ	標準	8.4	9.3
	下限	9.6	10.5

ジッタ最小法適用後

録再ジッタ[%]		メディア	
		標準	下限
ドライブ	標準	8.4	8.7
	下限	8.5	8.9

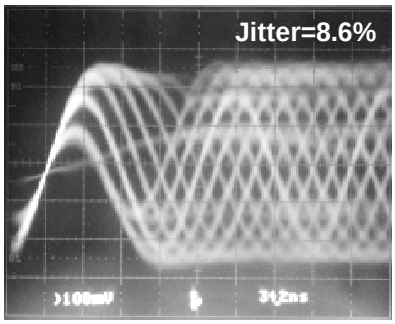


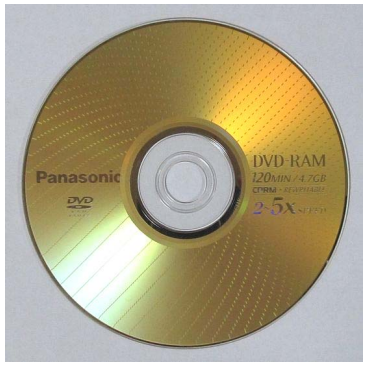
図 6.7　ジッタ最小法適用の効果

6.3　再生および記録の指紋対策

4.7GB DVD-RAM では、図 6.8 左の様に、メディアの汚れを気にせず容易にハンドリングでき、データの信頼性を確保するためにカートリッジタイプが用意されている。一方、メディアのより低いコストやドライブの薄さを追求する場合は、図 6.8 右の様な裸ディスクを選択できる。この場合、ユーザが無意識に記録面に触れる確率が増え、指紋が付着する場合がある。図 6.9 に示す写真は、指紋の典型的な例であり、直径約 1cm の範囲に、約 0.5mm 間隔で紋脈に対応した指紋が転写されている。光ディスクは、一般に、盤面上では光スポットが大きく原理的に汚れに対して強い方式であるが、それでも指紋の汚れは記録再生への悪影響が避けられない場合がある。この影響を少しでも低減するために、再生と記録それぞれに改善対策が必要である。

本節では、指紋が付着して乱れた再生信号に正確に追従して、低エラーの 2 値化を行うエンベ加算 2 値化再生方式と、記録膜に到達するレーザビームの指紋によるパワー減衰を補正する R-OPC（Running - Optimum Power Control）記録方式を提案し検証する。

カートリッジタイプ



裸ディスクタイプ

図 6.8　2 つのタイプの DVD-RAM メディア形態

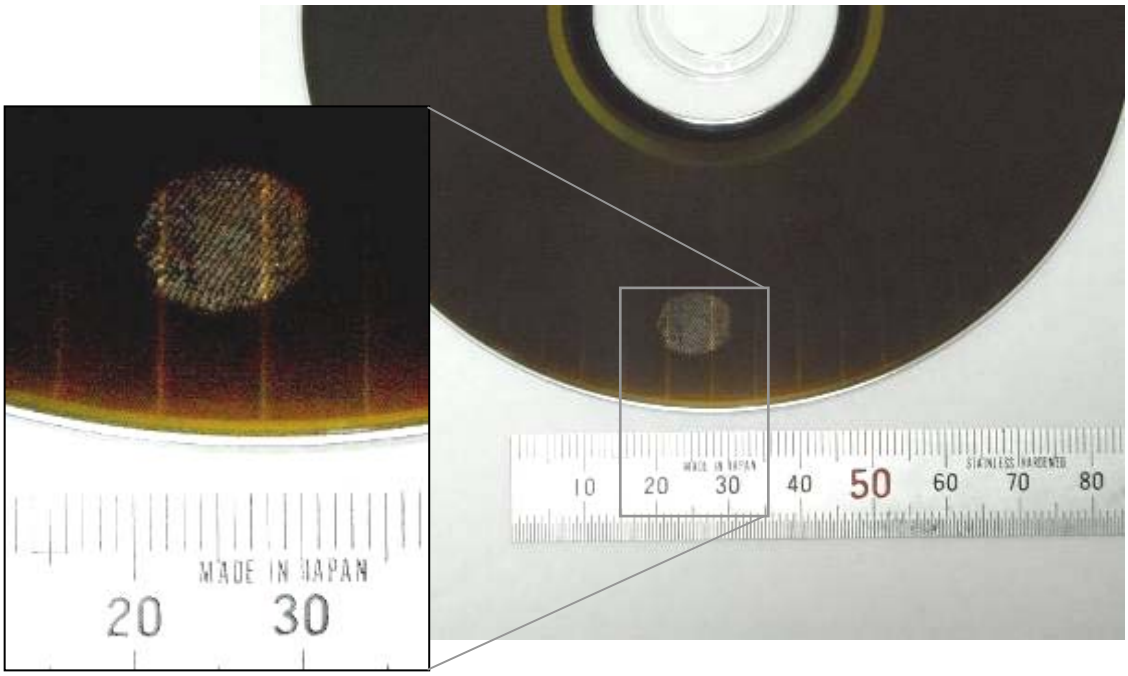


図 6.9 ディスク記録面に付着した指紋の例

6.3.1 エンベ加算 2 値化再生方式

図 6.10 上に示す、デューティフィードバック（FB）2 値化回路は、従来からある 2 値化方式であり、再生信号の DC フリー特性を利用して、2 値化後のディジタル信号の Hi 期間と Lo 期間の平均値が一定となるように、コンパレータのスライスレベルをフィードバック制御する。その応答速度は、信号自身の有効成分には追従しないよう信号帯域以下に設定される。例えば、DVD 標準速の 8-16 変調符号に含まれる DC 成分は、光ビームのサーボ特性の安定化を意図して DC～約 10KHz までは低く抑圧されている。指紋の周波数成分は、丁度この 10KHz あたりの成分が強いが、スライスレベルの追従性の改善のために、FB スライサの応答を 10KHz 以上にすると符号成分に過応答してしまいジッタが悪化する。そこで本提案では、振幅応答ではなく位相応答の改善に着目し、急峻に変化する再生 RF 信号の変動成分をエンベロープ信号（包洛線）から検出し、フィードフォワード（FF）成分としてスライスレベルに加算する、エンベ加算 2 値化再生方式を考えた。

図 6.10 下に示すように、再生信号の上包洛線レベルをピークエンベ検波で、下包洛線レベルをボトムエンベ検波で検出し、その平均値をフィードバック系の積分結果に加算する。図 6.11 は、エンベ加算をせずに FB のみ（黒）と、エンベ加算をした FF 加算（赤）のスライスレベルの周波数特性を示した。両者の振幅応答が-3dB となる帯域幅は同じであるが、位相応答は FB のみの-45°位相遅れに対して、FF 加算した場合は-29.8°に改善されている。図 6.12

は、振幅変動を加えたシミュレーション再生信号で、スライスレベルを比較した波形である。FB では急峻な振幅変動に対してスライスレベルの位相遅れを生じているが、FF 加算では位相遅れが低減し、過渡応答が優れているのが分かる。次に、図 6.13 は実際の再生信号で指紋有りと無しを比較した。指紋付着がない場合は、FB およびエンベ加算の両者でほぼ同じジッタ性能が得られている。一方、指紋有りの場合は、FB では 2.5%以上のジッタ悪化が生じているのに対し、エンベ加算では 1%以内の劣化で済んだ。

即ち、エンベ加算 2 値化再生方式により、ディスク表面に付着する指紋に対してスライスレベルの高精度な位相応答を実現し、データ再生の信頼性を高めることが出来た。

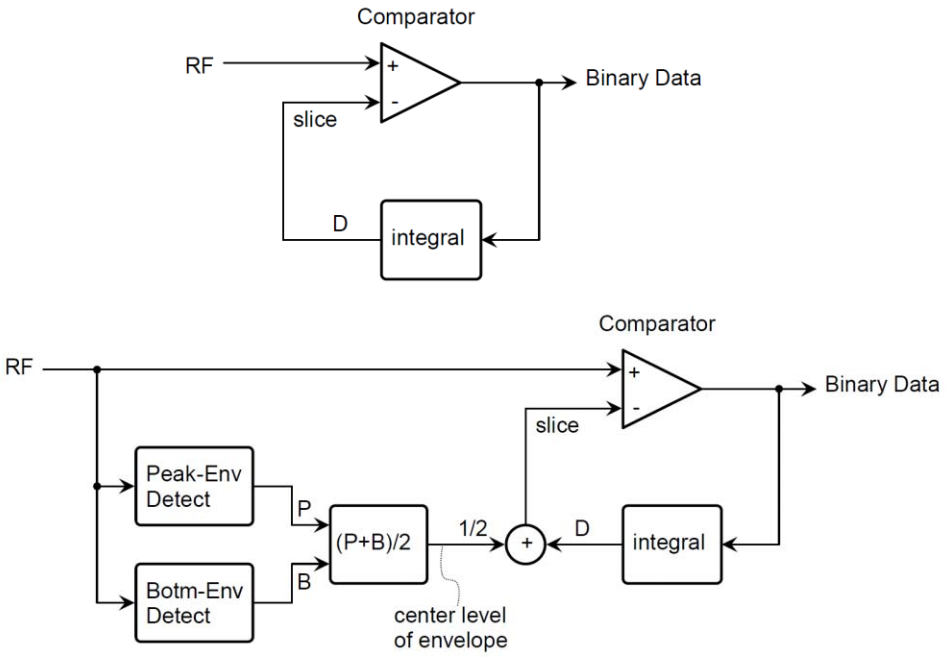


図 6.10　デューティ FB (上) と、エンベ加算 FF+FB (下) の 2 値化再生方式

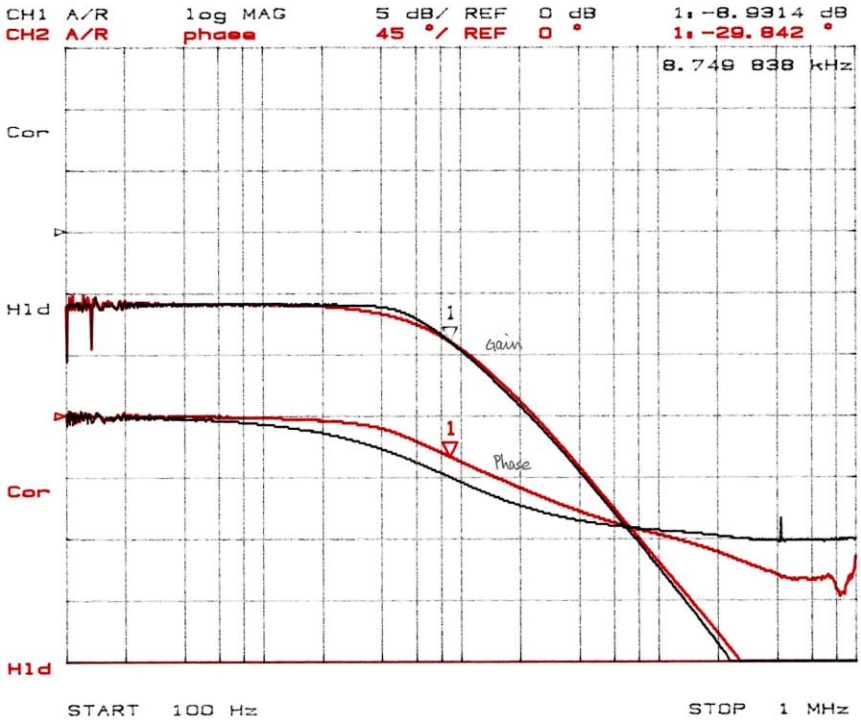
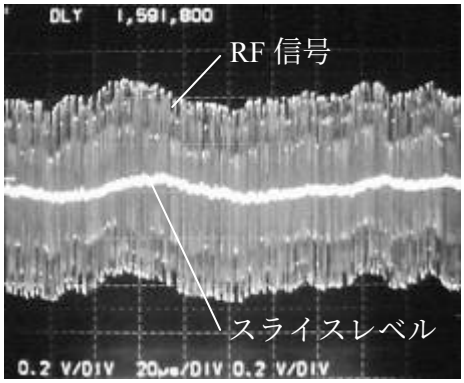
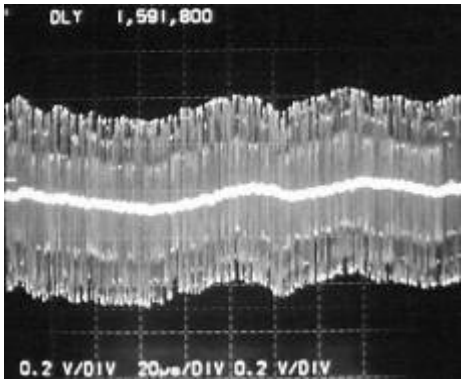


図 6.11 エンベ加算 2 値化再生方式におけるスライスレベル応答特性

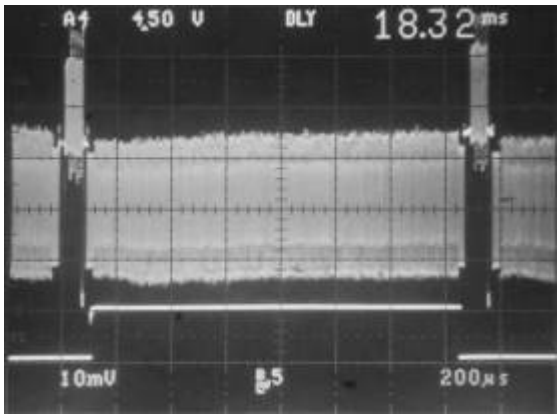


デューティ FB 方式

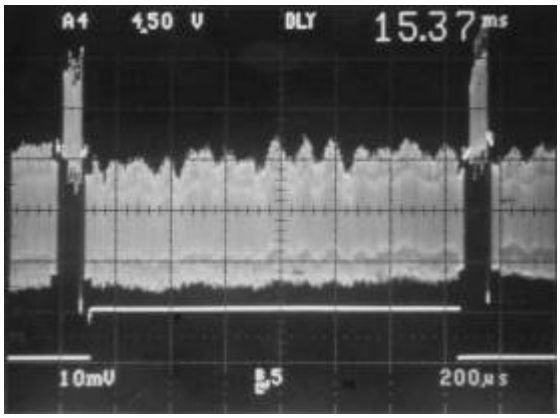


エンベ加算 FF+FB 方式

図 6.12 シミュレーション再生波形によるスライス応答の比較



指紋無し
FB 方式　σ=6.83%
エンベ加算方式　σ=6.86%



指紋あり
FB 方式　σ=9.44%
エンベ加算方式　σ=7.82%

図 6.13　DVD-RAM 再生信号における指紋有無の比較

6.3.2　Running-OPC 記録方式

光ディスクに指紋が付いた状態で記録を行うと記録膜に到達するレーザパワーが弱まる。記録しながらパワー減衰の度合いを検出することが出来れば、記録パワーを逆補正できると考えた。

付着度の異なる複数の指紋に対して、記録中のウォブル信号振幅と記録後の再生 RF 信号の振幅をプロットしたところ、図 6.14 のように高い相関を示すことが分かった [6,7]。なお、記録中の検出手段として、加算系の RF 信号では指紋の影響よりもトラックが初回記録かオーバライトかによって検出信号が大きく変動してしまう不具合があるが、差動系のウォブル信号では記録部・未記録部に関わらず安定に検出可能である。

図6.15はレーザパワー制御系のブロック図である。以下の特徴を有する。ウォブル振幅は、ディスクによってばらつきがあり、その検出レベルはオフセットを持つので、通常時に 1.0 となるよう正規化する。また、光ビームは往路、復路のダブルパスで指紋を通過するため、検出信号の平方根で減衰率を検出しその逆数でレーザパワーを補正する [8,9]。この時、パワー補正したことによるウォブル振幅の増加分をキャンセルするために、正規化の検出補正を行う。このように、記録しながら常時記録パワーを最適制御する方式を、R-OPC（Running - Optimum Power Control）と名付けた。

DVD-RAM ディスクへ本方式を適用して記録した結果を図 6.16 に示す。実験的に程度の強い指紋を付着させてディスクへ記録したときの再生 RF 信号を示す。図 6.16 写真上は R-OPC

が無い場合であり、指紋の影響により記録信号の局所減衰が激しい。一方、R-OPC を動作させた場合は、写真下に示すように多くの部分で正常時の RF 信号振幅の 50～90%まで回復可能であった。但し、R-OPC を施しても再生 RF 信号が 50%未満のところが残ってしまう。その場合でも、区間が短ければエラー訂正により読み出し可能となる。なお、一般的な強さの指紋付着に対して本 R-OPC を適用すれば、指紋の影響を抑えた記録が可能となる。振幅変動がある程度残っても、前節のエンベ加算 2 値化再生方式などで正常に再生できる可能性が高い。

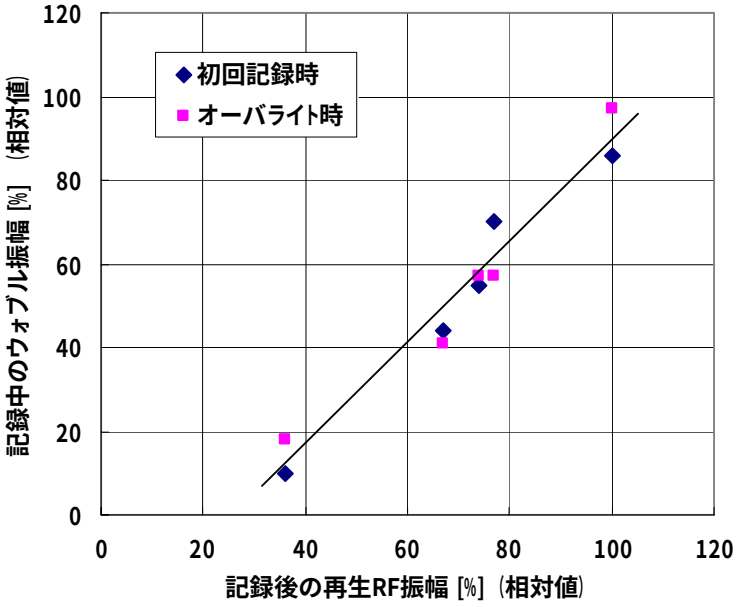


図 6.14　指紋による RF 信号の減衰とウォブル信号の関係

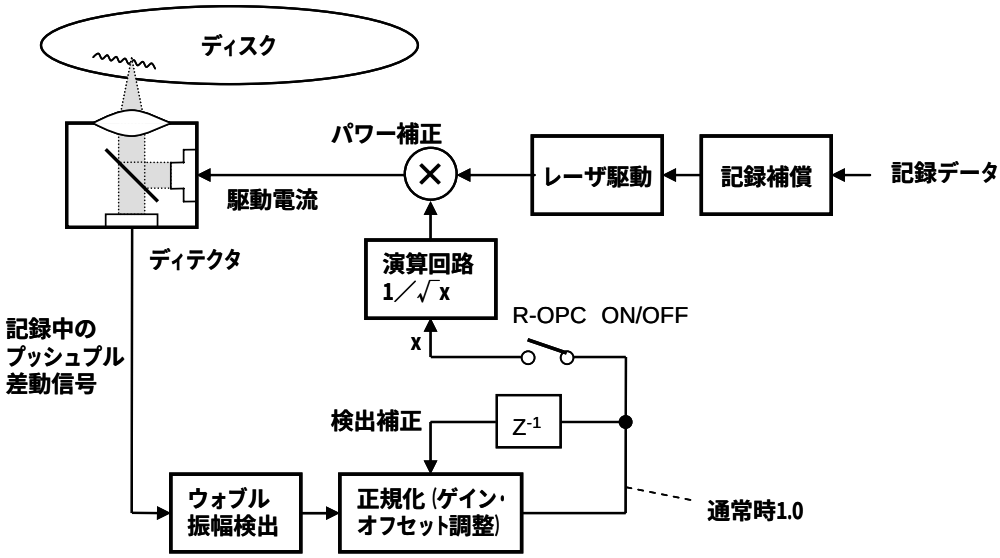
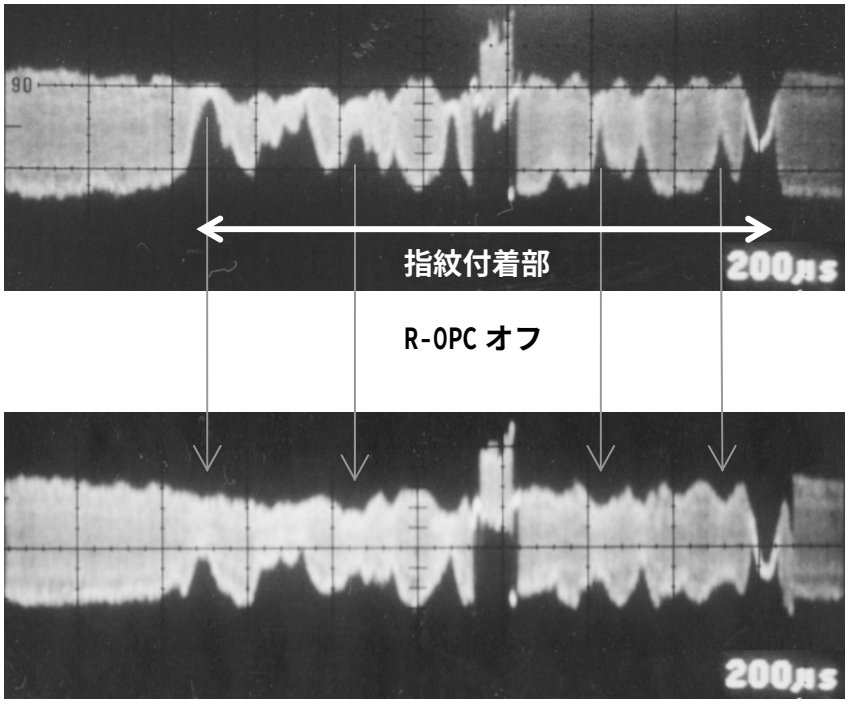


図 6.15 ウォブル R-OPC によるレーザパワー制御方式



R-OPC オン

図 6.16 指紋付着トラックへの R-OPC 適用結果

6.4　再生ストレスマージンの拡大

6.4.1　ディスクチルトとサーボオフセット

ディスク基板に用いられているポリカーボネイト樹脂は吸湿性があり、急激な温度変化、湿度変化により膨張収縮を起こす。このときディスクは波打ったり、お椀状に反ったりする。ドライブからディスクの記録面へ鉛直にレーザビームを照射しても、記録トラックに対してビームが傾くことになり、ビームスポットの集光性が悪化する。このようなディスク記録面と入射レーザビームの角度の傾きをディスクチルトと呼ぶ。チルトには、ビームの進行方向に傾くタンジェンシャルチルト（Tangential-tilt、T チルト）と、ディスク半径方向に傾くラジアルチルト(Radial-tilt、R チルト)があり、実使用環境では、T チルトは±0.5°、R チルトは±0.7°程度を想定する必要がある。ビーム形状の悪化（おもに収差）により再生信号の周波数特性や歪み、トラック間のクロストーク性能が変化する。

また、温特、経時劣化などにより OPU の信号検出誤差やサーボ回路のドリフトが発生し、光ビームスポットと走査する信号トラックの位置関係がずれる場合があり、オフトラックやデフォーカスが起こる。また、ディスクチルトによってもトラッキングやフォーカスの誤差検出にアンバランスを生じさせる原因となる。DVD-RAM の場合、オフトラックとしては±0.06μm、デフォーカスとしては±0.3μm 程度を想定する必要がある。オフトラックやデフォーカスが生じると、やはり再生信号の周波数特性やクロストーク性能が変化する。

これらの変動要因を再生ストレスと呼ぶ。高信頼なデータ記録再生を実現するためには、各種再生ストレスが生じても常に安定に再生できる様に、ドライブにマージンの広い再生信号処理方式を導入することが重要である。

6.4.2　PRML（Partial Response Maximum Likelihood）方式

光ディスクの記録密度が高いと、再生ビーム径の中に 2 つ以上のマークが含まれる様になる。その再生信号は、前後の複数マークの応答が混ざって符号間干渉が生じる。通常の bit-by-bit の 2 値化法では、符号間干渉の生じた再生信号から、個々のマーク信号を分離するために波形等化を施す。即ち、高周波ブースト特性のイコライザを通すことにより符号間干渉を取り除いて、1 ビットごとにレベル判断して 0 または 1 へ 2 値化する。この方法では、さらに記録密度が高くなると、符号間干渉が完全に取りきれずに 2 値化段階で誤りが生じるようになる。

一方、PRML（Partial Response Maximum Likelihood、中間値を用いた最尤復号）法は、符号間干渉を取り除くのではなく、符号間干渉を残した既知の周波数特性に等化して再生する方法である。光ディスクに記録された信号は、マークとスペース長が離散的に制限された RLL コードである。また、光ディスクの再生系の周波数特性は LPF であり、インパルス応答で見ると LPF の正の係数が符号間干渉の長さ分続いた波形応答とみなせる。従って、決まった符

号間干渉を与えられた RLL 再生信号のたどる波形変化に着目すると、単位時間後の再生信号は何種類かの中間値に予想できるようになる。そこで、この予想可能な信号系列を期待値として複数用意しておき、再生されてくる信号と逐次誤差演算をすることで、その中から一番誤差の少ない、即ち、最も確からしい信号系列を選択すれば、bit-by-bit の 2 値化より高い確率で正しい信号系列を得ることが出来る。これが PRML の仕組みである。また、信号規則としてあり得ない変化（例えば 1T 信号の出現）はエラーとして訂正可能である。PRML を用いると、bit-by-bit より信頼性が向上する。

この既知の符号間干渉の等化特性を PR クラスといい、その特性をインパルス応答で表記したときの係数の比率が例えば 3：4：4：3 の場合、PR(3443)と表記する。また、クロック単位毎に等化信号の取り得る期待値と信号系列は、状態遷移として把握され、例えば 5 値 6 状態などと規定される。最尤復号の演算には、トレリス線上でユークリッド距離を計算するビタビ復号 [10]を用いる。PRML は元々通信用の畳み込み符号化として発展した技術であるが、磁気ディスクの再生系に適用した先行例 [11,12]がある。一方、著者らは 1995 年に初めて相変化光ディスクに適した PRML 方式として、相変化光ディスクに固有な RF 振幅変動に対して PR 等化の期待値を追従させる方法、求めた最尤複合結果から位相誤差を抽出する PLL 方式を提案した [13,14,15]。

PRML 処理では、相関のないノイズが再生信号に含まれると仮定している。一方、相変化光ディスクでは、オーバライトの影響などによる記録膜の反射率変動、記録時のレーザパワーずれによるマークのアシンメトリなど、再生信号波形に低周波の非線形なレベル変動がある。相変化光ディスクに PRML 処理を適用するには、再生信号に含まれる非線形歪みに対応させることで誤り率の改善が期待できる。そのための制御器は、図 6.17 の様に、生き残りパスの値に従って異なるメモリに再生信号を格納し平均値を求めることで、相関のないノイズ成分が相殺され、理想的な PR 等化で期待される振幅値とレベル変動成分の和となる等化期待値を算出できる。

図 6.18 に示す測定系で原理検証した。波長 785nm、レンズ NA0.55 の相変化光ディスクから再生される (1,7)RLL ランダム信号を 200MS/s で A/D 変換（8bit）し、これを計算機処理によって PR(121)処理を施しビットエラーレート(bER)を測定した。結果は、図 6.19 に示すように、PRML では従来の 2 値検出に比べて、記録密度 0.43μm/bit の時の bER が 1/5 に、記録密度 0.375μm/bit の時の bER が 1/20 に改善された。期待値自動でレベル変動を補償すると特に高密度記録時に効果が現れ、記録密度 0.375μm/bit の時、bER がさらに 1/5 に改善された。相変化光ディスクに固有な再生信号に含まれるレベル変動を検出し補償する方式を PRML 信号処理に取り入れることにより、従来の方法に比べ 1/5～1/100 の誤り率が達成できた。

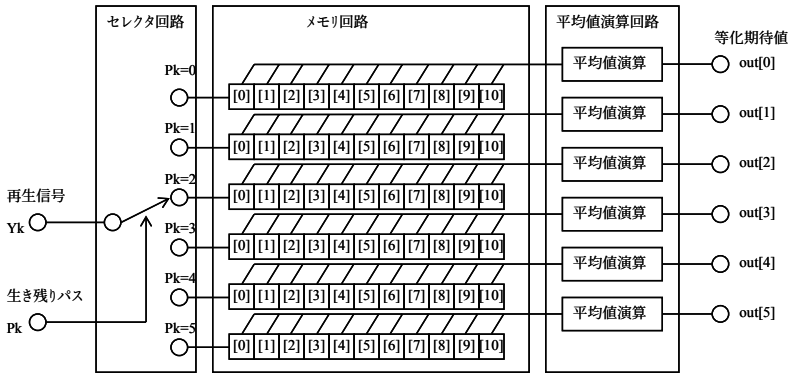


図 6.17　期待値制御器

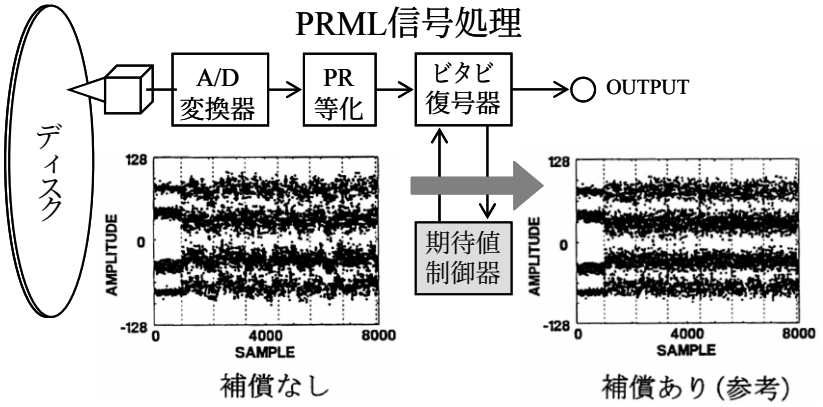


図 6.18　PRML 信号処理の測定系

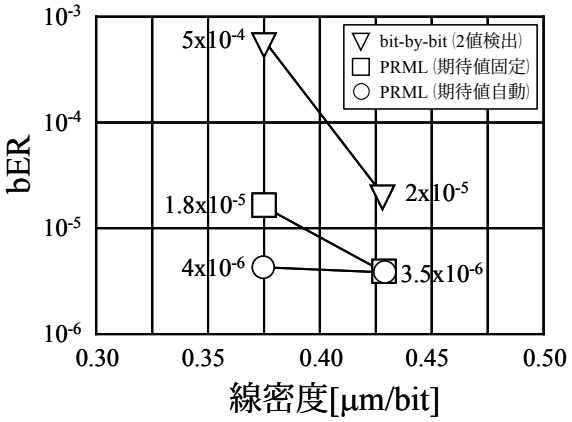


図 6.19　bER 評価結果

次に、波長 650nm、NA=0.60、記録密度 0.28μm/bit の 4.7GB DVD-RAM を用いて本提案の PRML の再生ストレスに対するエラー率改善効果を検証した。ストレスとしてラジアルチルト、タンジェンシャルチルト、デフォーカス、オフトラックを想定した。ディスクチルトは評価装置のピックアップを傾けることで、サーボ誤差は制御回路に電圧オフセットを与えることで付加した。実験の記録再生条件は、(2,10)RLL 符号、マークエッジ記録、パタン適応型記録補償方式、PR(3443)、5 値 6 状態ビタビ、線速度 8.2m/s である。図 6.20 に結果を示す。横軸は加えたストレスの度合い、縦軸はジッタと bER を表す。タンジェンシャルチルト、デフォーカス、ラジアルチルトなど、周波数特性の変化を伴い信号系列に沿った符号間干渉を増大させるストレスに対しては、bER の改善効果が大きい。一方、隣接トラックの無相関クロストークが漏れ込むオフトラックに関しては、比較的改善効果が小さかった。以上のストレス要因に対する PRML のマージン改善効果を表 6.1 にまとめた。相変化光ディスクの再生信号に含まれる非線形歪みに対応させた本提案の PRML 方式は、再生ストレスマージンを広げ、高信頼のデータ再生に極めて有効である。

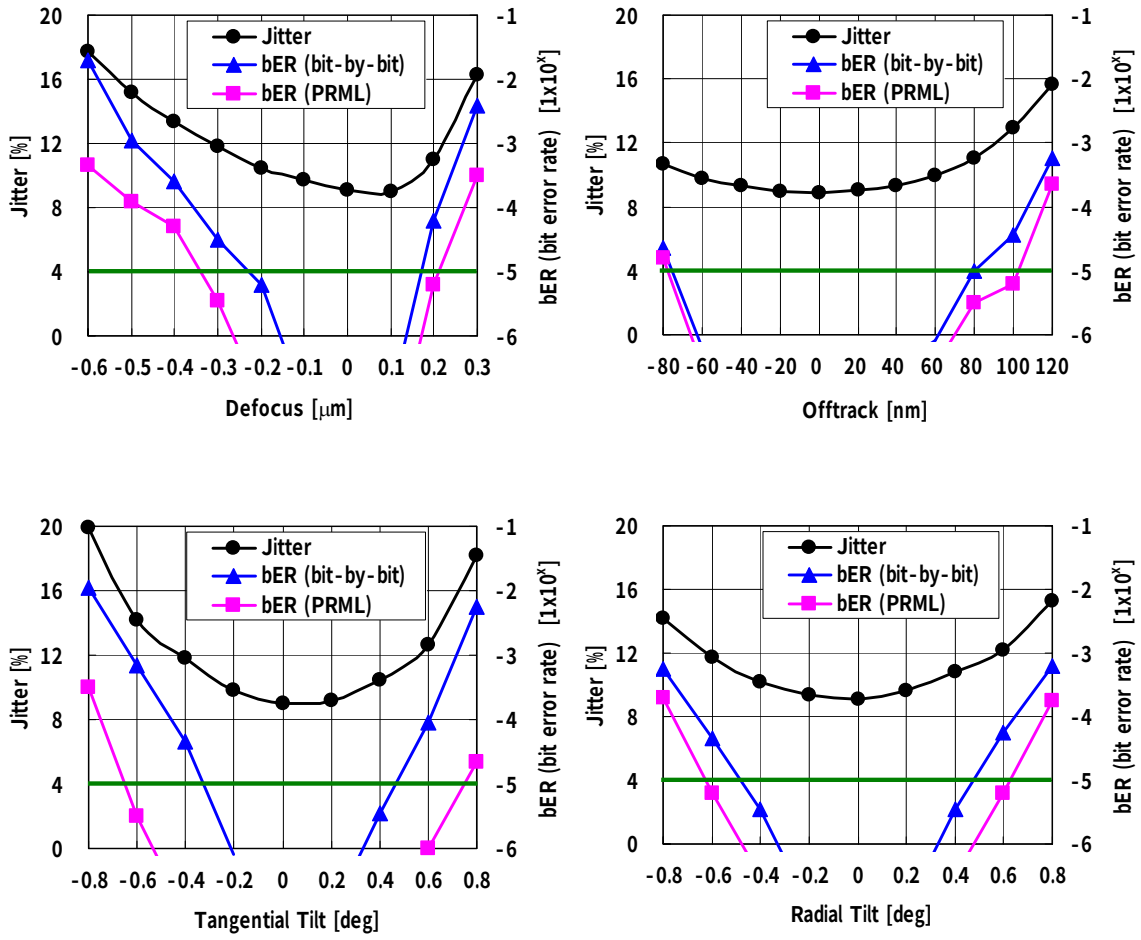


図 6.20 再生ストレス時、bit-by-bit と PRML の bER 比較

表 6.1 ストレス要因と PRML のマージン改善効果

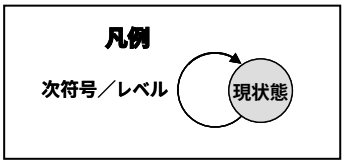
ストレス	劣化主要因	PRML効果 マージン拡大として	PRML効果 bER改善として	改善効果
Defocus	ビーム収差 解像度低下	0.5〜1.0μm	1/10	○
Offtrack	クロストーク増加 ノイズ増加	0.01μm	1/3	△
Tangential-tilt	ビーム収差 周波数特性劣化	0.3deg	1/100	◎
Radial-tilt	クロストーク増加 周波数特性劣化	0.15deg	1/10	○

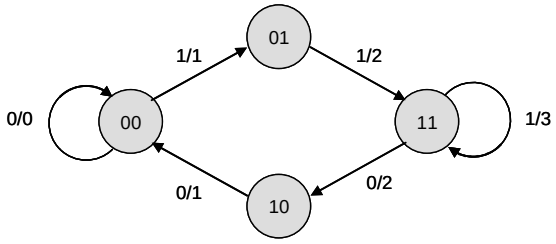
PRML 方式では、表 6.2 に示すように、目標とする記録密度と用いる記録変調符号から、最適な PR クラスが決まる。(1,7)RLL 符号＋波長 780nm・NA0.55、記録密度 0.375μm/bit のマークエッジ記録には PR(121)、DVD-RAM の条件の(2,10)RLL 符号＋波長 650nm・NA0.60、記録密度 0.28μm/bit のマークエッジ記録には PR(3443)の組み合わせが適する。記録密度が高くなり符号間干渉が大きくなると、PR クラスの等化係数が増えビタビ復号の状態遷移も複雑になる。図 6.21 に変調符号と PR クラスに応じた状態遷移図を示した。

なお、その後の応用検討により、4.7GB DVD-RAM 用の PRML 処理 LSI が実用化され [16]、青色レーザ系でも PRML を用いて 25〜50GB 容量が実証 [17,18,19]され、また、アダプティブイコライザによりアシンメトリ再生信号でのエラー率が飛躍的に改善 [20]された。更に、3 層 100GB の BD-XL 規格 [21]では、PR(12221)方式が標準採用されるに至った。本研究の提案による PRML 再生方式は、相変化光ディスクドライブの高信頼化技術として極めて有効であり、パナソニックの DVD、BD 製品に搭載されている。

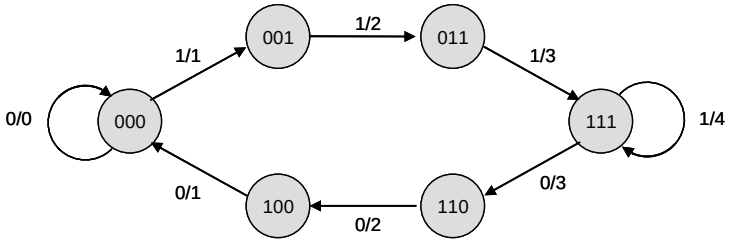
表 6.2 PR クラスと状態遷移の関係

光学系	線ビット密度	変調方式	PRクラス	状態遷移
λ785nm/NA0.55 本研究の原理検証	0.375 μm/bit	(1,7)RLL	121	4値4状態
λ650nm/NA0.60 4.7GB (DVD)	0.28 μm/bit	(2,10)RLL	3443	5値6状態
λ405nm/NA0.85 25GB (BD)	0.112 μm/bit	(1,7)RLL	1221	7値6状態
λ405nm/NA0.85 100GB (BD-XL)	0.084 μm/bit	(1,7)RLL	12221	9値10状態

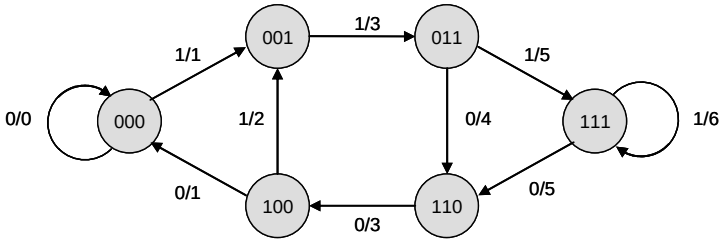




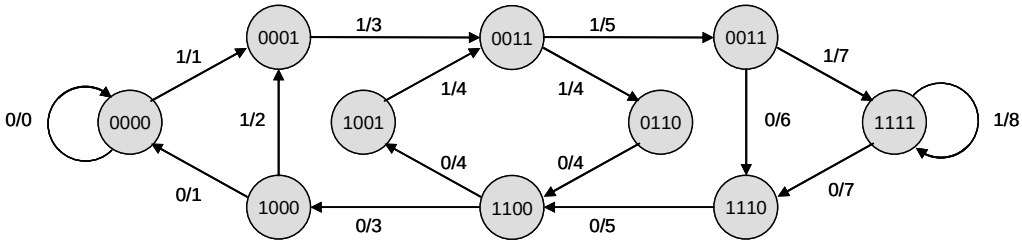
(1,7)RLL＋PR(1,2,1)　4値4状態ビタビ復号



(2,10)RLL＋PR(3,4,4,3)　5値6状態ビタビ復号



(1,7)RLL＋PR(1,2,2,1)　7値6状態ビタビ復号



(1,7)RLL＋PR(1,2,2,2,1)　9値10状態ビタビ復号

図 6.21　変調符号と PR クラスに応じた状態遷移図

6.5　まとめ

光ディスクメディアとドライブが、実験室ではなく実際の市場で使用される状況においては、大量生産における製品のばらつき、指紋などディスク表面の汚れ、経時的な特性劣化、温度湿度の影響を受ける。そのような状況下でも、メディアのポテンシャルを最大限に引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶することができるドライブ方式を検討した。

ドライブに挿入されたメディア毎に最適な記録パルス条件を求める自動最適化の手法としてジッタ最小法を提案し、量産ディスクとドライブのばらつきに対して、データ記録の信頼性向上と互換性確保を実現した。

光ディスク表面に付着する指紋に対して、エンベ加算 2 値化再生方式を提案し、スライスレベルの高精度な位相応答を実現し、データ再生の信頼性を高めた。また、記録中のウォブル信号振幅から指紋検出を行いつつ、記録しながら常時記録パワーを最適制御する R-OPC 方式を提案し、その効果を実証した。

更に、相変化光ディスクに固有な RF 振幅変動に対して最尤複合の等化期待値を追従させる PRML 方式を提案し、ラジアルチルト、タンジェンシャルチルト、デフォーカス、オフトラックの再生ストレスに対してエラー率改善効果を実証し、マージンの広い高信頼のデータ再生技術を実現した。

参考文献

1) 岩坪正勝、新免恵三、佐野強、内田伸: “タイムインターバルアナライザ TA520”, 横河技報 **44**, No. 1 (2000) 29.
2) S. Furumiya, J. Minamino, and M. Shoji: “Method and Device for Finding Conditions on Recording Pulse of Optical Disk”, U.S. Patent 6791926 (2004).
3) 古宮成、南野順一、東海林衛: “光ディスクの記録パルス条件を求める方法および装置”, 特許第 4553968 (2010).
4) 古宮成: “光ディスク記録再生装置”, 特開 2002-74668 (2002).
5) S. Furumiya, T. Fukushima, and Y. Yamazaki: “New Method of Calibrating Adaptive Writing Pulses for Digital Versatile Disc Random Access Memory (DVD-RAM) 4.7GB Drive”, Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 1694.
6) C. Inokuchi, T. Akagi, S. Nishiwaki, K. Nagashima, A. Miyazaki, and H. Yamaguchi: “Recording Laser Power Control Method Based on Wobble Signal Amplitude Detection”, Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage 1999 (ISOM/ODS’99), Tech. Dig. (1999) 23.

7) 山口博之、麻田潤一、山田真一、南野順一、宮崎篤志: “4.7GB DVD-RAM ドライブの開発”, IEICE Tech. Rep. MR99-79 (2000) 21.
8) 井口睦、古宮成、宮端佳之、久門裕二、宮崎篤志、赤木俊哉: “レーザーパワー制御装置および光ディスク装置”, 特許第 4413432 号 (2009).
9) C. Inokuchi, S. Furumiya, Y. Miyabata, Y. Hisakado, A. Miyazaki, and T. Akagi: “Laser Power Controler and Optical Disk Device”, U.S. Patent 6621779 (2003).
10) A. J. Viterbi: “Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Aalgorithm”, IEEE Trans.Inf. Theory IT-13-2 (1967) 260.
11) 三田誠一: “磁気ディスク用信号処理技術の最近の展開”, 信学論 C J75-C2 No.11 (1992) 611.
12) 大沢寿, 岡田誠, 若宮幸平, 岡本好弘: “(1,7)RLL 符号に対する PRML 方式の誤り率特性改善”, 信学技報 MR94-62 (1994) 9.
13) 中嶋健、古宮成: “相変化光ディスクに適した PRML 信号処理方式の検討”, Proc. 1995 Elec. Society of Conf. IEICE C-348 (1995) 40.
14) 中嶋健、古宮成: “相変化光ディスクにおける PRML 信号処理方式の検討”, IEICE Tech. Rep. MR95-74 (1995) 45.
15) T. Nakajima, S. Furumiya, Y. Takemura, and K. Koishi: “Method of Maximum Liklihood Decoding and Digital Information Playback Apparatus”, U.S. Patent 5719843 (1998).
16) 小倉洋一、平塚隆繁、瓜田耕一、小西信一、中嶋健、丸川昭二: “PR(3,4,4,3)ML を用いた高密度光ディスクリードチャネル信号処理方式およびシステム LSI 化について”, ITE Tech. Rep. MMS2000-73 (2000) 25.
17) 宮下晴旬、中村敦史、南野順一、東海林衛: “PRML を用いた記録容量 25GB 相変化光ディスクの信号処理方式について”, ITE Tech. Rep. MMS2001-49 (2001) 13.
18) M. Shoji, A. Nakamura, H. Miyashita, J. Minamino, S. Furumiya, T. Ishida, and H. Ishibashi: “High-Density Recording on a Phase-Change Rewritable Disk using a 405nm Blue Laser Diode”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1687.
19) A. Nakamura, M. Shoji, H. Miyashita, N. Miyagawa, N. Yamada, and T. Ishida: “High-Density Recording on a Dual-Layer Phase Change Disk Using Partial Response Maximum Likelihood Method”, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 1072.
20) H. Miyashita, A. Nakamura, T. Nakajima, J. Minamino, S. Furumiya, and H. Ishibasi: “New Prml for Asymmetrical Signals in High-Density Optical Disks”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1787.
21) Blu-ray Disc Association: White Paper of Physical Format Specifications for BD-RE, 3rd edition http://www.blu-raydisc.com/Assets/Downloadablefile/BD-RE_physical_format_specifications-18325.pdf (2010) 17.

第7章　結論

7.1　本研究の成果

本研究の目的は、相変化原理に基づく書き換え型光ディスクシステムの理想的実現手段を追究し、相変化材料の持つ特徴とポテンシャルを最大限に引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶することができるメディア形態、ドライブ方式を具現化することである。そのために著者は、新しい光ディスクメディアの物理アドレス方式と、メディアを駆動する光ディスクドライブの高密度・高速・高信頼なデータ記録再生技術の検討を行い、以下の研究成果を得た。

(1)　メディアサンプルと光ディスク評価装置の開発 ＜第 2 章＞

相変化原理に基づく書き換え型光ディスクシステムを実現するために必要な研究環境を構築した。メディアサンプルの作製方法を明確化し、メディアの評価と記録再生処理方式の原型開発を行うプラットフォームとして光ディスク評価装置を開発した。更に、特性の評価指標として bER とジッタを導入した。これらを用いた試作・評価・改良の繰り返しによって、相変化材料のポテンシャルを引き出し、もっとも高効率かつ高精度に情報記憶するメディアの形態、ドライブの方式を検討する研究環境と方法を確立した。

(2)　相変化光ディスクの物理アドレス方式の開発 ＜第 3 章＞

高いデータ記録密度と優れた信頼性を兼ね備えた、新規な相変化光ディスクの物理アドレス方式を提案し実現した。波長 650nm の赤色レーザを用いた書き換え型相変化光ディスク用に、高密度記録のランド&グルーブ記録方式の信号トラックに好適な、１対になったオフセットピットアドレスの CAPA を提案し、光スポットがオフトラック状態でもアドレス検出の信頼性が極めて高いことを実証した。更に、波長 405nm 青色レーザを用いた多層書き換え型次世代光ディスク用に、連続グルーブ記録方式の信号トラックに好適な、鋸波形状をした STW と局所位相変調による MSK を併用したウォブルアドレス方式を提案し、ハイブリッド検出方式により光ディスクで想定されるあらゆる歪みに対して極めて検出能力が高いことを実証した。

(3)　高密度データ記録再生技術の開発 ＜第 4 章＞

相変化光ディスクに高密度記録するために新規なライトストラテジを提案し実証した。波長λ=785nm、NA=0.55 の光学系と、トラックピッチ Tp=1.2μm の書き換え型相変化光ディスクを用いた実験で、エッジシフト課題の要因を特定し、それを解決するパタン適応型記録補償方式を考案し原理確認した。また、波長λ=650nm、NA=0.60 の光学系と、トラックピッチ

Tp=0.615μm のランド&グルーブ相変化光ディスクに、パタン適応型記録補償方式を適用することにより、高密度記録で生じる熱干渉を効果的に相殺し、4.7GB DVD-RAM システムを実現した。更に、波長λ=405nm、NA=0.85 の光学系と、トラックピッチ Tp=0.32μm の多層相変化光ディスクに、拡張したパタン適応型記録補償方式を適用することにより、光学スポットサイズより小さいマークを正確に形成し、3 層 100GB BD-RE システムを実現した。

(4)　高速データ記録再生技術の開発 ＜第 5 章＞

BD-R の高速データ記録再生技術として、追記型相変化材料 Te-O-Pd の持つポテンシャルを最大限に引き出すライトストラテジを提案し検証した。レーザ立ち上がり時間 Tr=0.7ns の L-Shape ライトストラテジを、放熱重視構成の単層 BD-R メディアに適用することによって、チャネルビットレート 500Mbps を超える BD8 倍速の高速データ記録を実現した。また、2 層 BD-R メディアの 4、6、10 倍速における 2T マーク記録のシミュレーションと実験により、ライトストラテジの記録パワー比 Ps/Pw（スペースパワー／記録パワー）が高速記録の重要パラメータであることを特定し、10 倍速記録の達成条件を導き出した。

(5)　高信頼データ記録再生技術の開発 ＜第 6 章＞

市場における様々な劣化要因の影響下でも性能マージンを有する高信頼の光ディスクドライブ方式を提案し実現した。記録補償条件を自動最適化するジッタ最小法を提案し、特性のばらつく量産メディアとドライブの互換性を確保した。また、光ディスク表面に付着する指紋に対して、エンベ加算による 2 値化再生方式と、ウォブル検出による Running-OPC 記録方式を提案し、その影響の低減効果を実証した。更に、相変化光ディスクの再生信号に好適化した PRML 方式を提案し、再生ストレスに対するエラー率改善効果を実証し、マージンの広い高信頼のデータ再生技術を実現した。

以上に述べた本研究の技術成果(1)～(5)により、ディジタル動画データを格納するに十分な記録容量、かつ、データファイル用途に十分な記録速度と信頼性を兼ね備えた、相変化光ディスクメディアの物理アドレス方式、および、光ディスクドライブの高密度・高速・高信頼なデータ記録再生技術を確立した。

7.2　波及効果と今後の展望

本研究で確立した数々の技術を応用展開することによって、DVD-RAM と BD-R/RE のフォーマット開発を業界で主導し、光ディスクメディア、PC 用の光ディスクドライブ、及び、家庭向けの光ディスクビデオレコーダをそれぞれ世界初の実用化へと導くことが出来た。

まず、動画や音声等を含む大容量ディジタルデータを AV 機器と PC 間で自由に交換できる AV&PC ブリッジメディアとして、1997 年に、本研究の CAPA アドレス方式を採用した相変化光ディスクの 2.6GB DVD-RAM が規格化された。1999 年には、本研究のパタン適応型記録補償方式により容量を増大させた 4.7GB DVD-RAM が実用化され、ビデオディスクレコーダが市場へ初投入された。以降、2001 年 12 月には、DVD プレーヤ・レコーダの国内出荷台数が VTR を上回ると共に、記録機能を有する PC 用 DVD ドライブは 2002 年に出荷 500 万台超の世界市場規模に成長した。

また、2002 年には、ディジタル HD ビデオシステム、および、データ用アーカイブシステムとして、本研究の STW アドレスを採用し、可視光最短の波長 405nm の青色レーザを用いた容量 25GB/50GB の BD-RE 規格が制定された。翌 2003 年に BS ディジタルハイビジョン放送を直接録画可能な BD レコーダが初出荷され、2006 年には PC 用の BD ドライブが市場投入された。また、2008 年には、本研究の L-Shape ライトストラテジを適用した高倍速対応の BD-R メディアとドライブが実用化された。更に、本研究の拡張型のパタン適応型記録補償方式が、3 層 Blu-ray Disc（BD-XL）実現のキーテクノロジーとして規格採用され、2011 年 4 月に 3 層 100GB BD-RE メディアの世界初実用化を果たした。

日本では、2011 年にテレビ放送の地上波および BS 波が完全ディジタル方式に移行したことに同期して、薄型大画面テレビ受像機と共に BD レコーダの普及が進み今日に至る。図 7.1 に、本研究の技術成果により実用化された製品例を、図 7.2 にこれら製品の世界出荷数の推移を示す。2000 年以降、急速に記録型 DVD が、また、2010 年から BD が本格普及し大きな市場を形成し、顕著な波及効果を生んだ。

DVD-RAM メディアと PC 用 DVD ドライブ

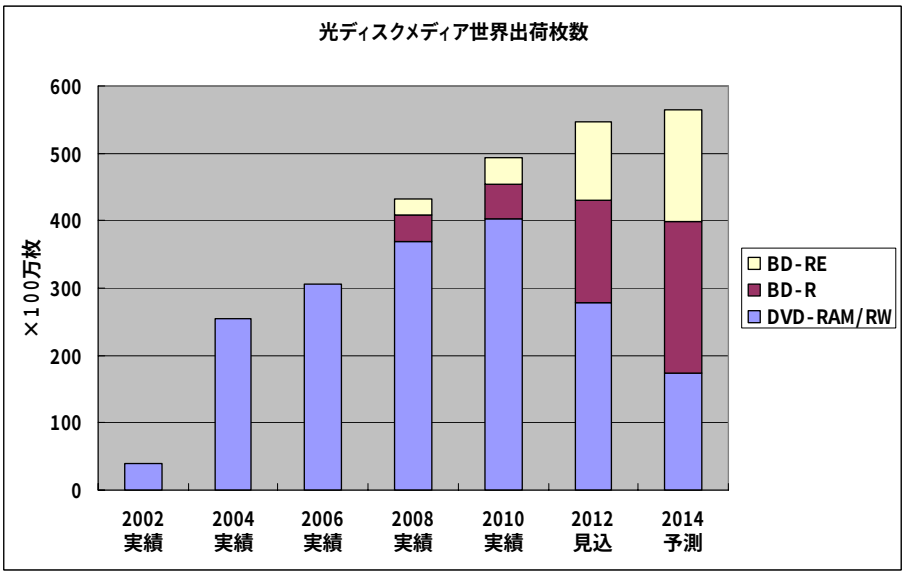
DVD ビデオレコーダ

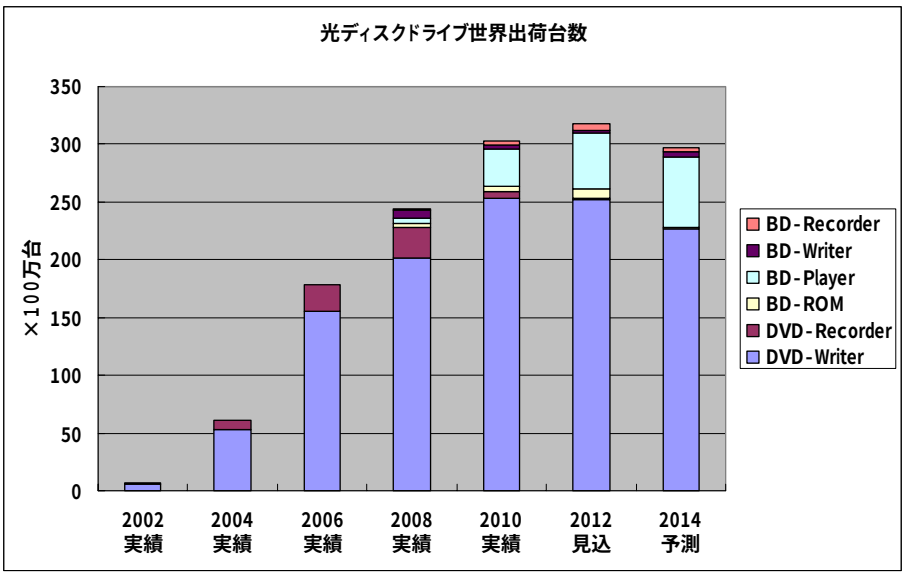
BD-R メディアと PC 用 BD ドライブ

BD ビデオレコーダ

3 層 100GB BD-RE メディア

図 7.1　本研究の成果により実用化された製品の例





ふじわらロスチャイルドリミテッド「FRLストレージニュース」(2006年11月)、及び、
富士キメラ総研「2012ストレージ関連市場総調査」(2012年4月)を元に作成

図 7.2 本研究の成果を応用した関連製品の出荷統計

以下に、次世代光ディスクシステムが目指すべき今後の展望を述べる。図 7.3 に、これまで実用化された主な相変化光ディスクシステムの記録容量と今後の予想を示す。世代の進化毎の容量増加率はおよそ 10 倍となっている。今後も同様の比率で大容量化が期待されており、次世代光ディスクシステムにおいてもデータ記録密度の向上が主たる研究課題となる。

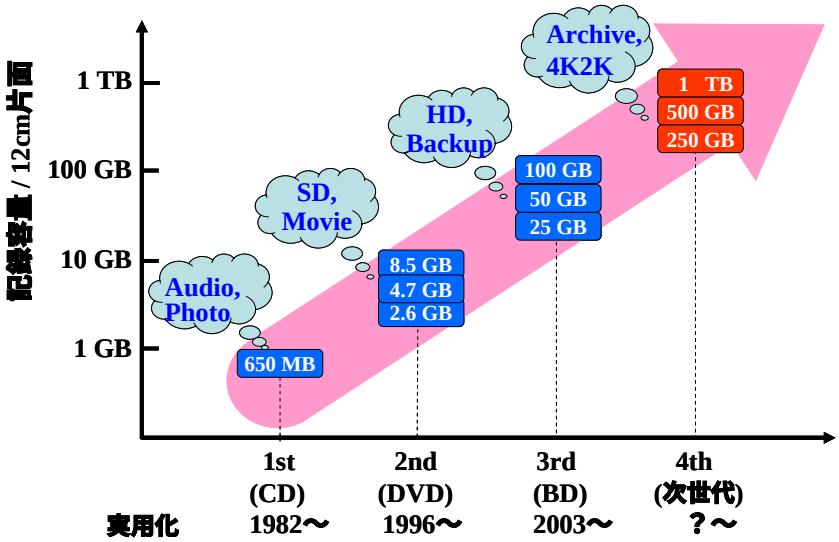


図 7.3 相変化光ディスクシステムの世代と記録容量の進化

光ディスクシステムは、メディアの可換性（removability）を特徴とし、非接触再生で高い信頼性を有する。著者は、今後もこの本質的な特徴を活かしつつ記録密度を高めることが重要と考える。光ディスクの記録密度を決定づける光スポット径は、レーザ波長に比例し対物レンズ NA に反比例する。本研究の成果として、波長 405nm と NA=0.85 の光学系を用いた BD システムでは 3 層 100GB の記録容量が実現された。しかし、更なる高密度化のために、これ以上短波長化と高 NA 化を追求すると、前記信頼性がトレードオフとなってしまう。次の 2 つは、BD 光学系をベースにした次世代光ディスクシステムの候補であり、本研究で確立したアドレス方式やデータ記録再生技術を応用できる新しい大容量化技術として有望である。

(1) 溝無し高透過率相変化記録層を周期的に積層し、最上層にトラッキング専用のガイド層を設けた超多層ディスク構造により、、例えば、1 層当たり 32GB、16 層 512GB を実現する多層化技術が報告されている。メディア 1 枚の信号層数を飛躍的に高める技術として注目さ

れている。

(2) 狭ピッチのランド&グルーブ記録を用いてトラッキングの安定性を確保し、クロストークキャンセルと高次の PRML を併用する信号処理方式により、例えば、トラックピッチ 0.225μm のランド&グルーブ相変化ディスクで、単層 50GB を実現する高密度化技術が報告されている。前項の多層化技術と組み合わせることによりディスク 1 枚当たり 500GB～1TB の可能性も出てくる。

今後は、加速的な情報化社会の拡大に応じて、クラウドなど通信系のデータ総量が指数関数的に増大することが予想されている。一方で、これらのデータを蓄えるデータセンターの運用電力の増大や、主デバイス HDD の災害脆弱性も懸念されている。光ディスクは、メディアがドライブから取り外し可能なので、大量のデータを維持する消費電力や保存信頼性に優れている。近い将来、高密度・高速・高信頼の次世代光ディスクシステムは、これら業務用データのアーカイブにも用途が広がるものと思われ、益々の技術進化が期待されている。

謝辞

本論文を完遂するにあたり、ご指導、ご鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授 藤原康文博士に謹んで感謝の意を表しますとともに厚く御礼申し上げます。

また、本論文を纏めるにあたり、懇切なるご検討とご指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授 掛下知行博士、同 教授 山下弘巳博士、大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 特任教授 山本和久博士に心より感謝申し上げます。

本研究は、著者がパナソニック株式会社（旧松下電器産業株式会社）在籍中に遂行したものです。

本研究の遂行にあたり、長期間にわたる研究の機会を与えていただき、多大なご配慮を賜りましたパナソニック株式会社 代表取締役社長 津賀一宏氏（元 AVC モバイルサーバー開発センター 所長）、同 常務取締役 宮部義幸氏（R&D 本部 本部長）、同 理事 岡秀幸氏（元デジタルネットワーク開発センター 所長）に厚く感謝いたします。

本研究の開始時点から常にご助言とご指導を賜り、また、本論文を纏める動機付けを頂きました京都大学大学院工学研究科 特定教授 山田昇博士（元デジタルネットワーク開発センター メディア総括担当参事）に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり貴重なご指導と適切な方向付けを賜りました田中伸一氏（元メディア制御システム開発センター 所長）、守屋充郎氏（元デジタルネットワーク開発センタードライブ総括担当参事）、大原俊次氏（R&D 本部 BD 担当技監）に心より御礼申し上げます。

また、本研究の光ディスクドライブ関連の共同研究者として有益なご討論とご協力を頂きました石橋広通氏、石田隆氏、日野泰守氏、中嶋健氏、宮下晴旬氏、南野順一氏、久門裕二氏、東海林衛氏、中村敦史氏、中尾政仁氏、二口龍太郎氏、井口睦氏に心より感謝いたします。

また、本研究の光ディスクメディア関連の共同研究者として有益なご討論とご協力を頂きました西内健一博士、大野鋭二博士、宮川直康氏、児島理恵博士、鳴海建治氏、北浦秀樹氏、高橋克幸氏、土居由佳子氏、西原孝史氏、土生田晴比古氏、槌野晶夫氏、高岡友康氏に心より感謝いたします。

また、本研究の早期においては、北浦坦氏、竹村佳也氏、小石健二氏より適切なご指導ご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

更に、本研究の光ディスクフォーマット関連の共同提案者として貴重なご討論とご協力を頂きましたソニー株式会社 小川博司氏、小林昭栄氏、オランダ Philips 社 Kees SCHEP 博士、Bert STEK 氏に心より感謝いたします。

最後に、本研究を遂行するにあたって、お名前を挙げていない数多くの方々のご指導ご協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

平成 24 年 12 月 25 日
古宮　成

本論文に関する主要業績

発表論文

1) **S. Furumiya** and Y. Fujiwara: “Laser Pulse Compensation Applied to Phase-Change Recording Film to Form Nano-Sized Marks”, Journal of Physics: Conference Series **417** (2013) 012050.
2) A. Nakamura, I. Kobayashi, K. Narumi, T. Takaoka, **S. Furumiya**, and N. Miyagawa: “33.4 Gbyte/Layer Recording with Adaptive Write Strategy for 100 Gbyte Rewritable Triple-Layer Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 08KG01.
3) **S. Furumiya**, H. Kitaura, K. Narumi, N. Miyagawa, and N. Yamada: “Ten-Times-Speed Recording on Dual Layer Blu-ray Disc Recordable Media”, Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 5878.
4) **S. Furumiya**, K. Takahashi, H. Kitaura, N. Miyagawa and N. Yamada: “Over-500-Mbps Data Recording on Write-Once Media with L-Shaped Write Strategy”, Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 1223.
5) S. Kobayashi, **S. Furumiya**, B. Stek, H. Ishibashi, T. Yamagami, and K. Schep: “Wobble-Address Format of the Blu-ray Disc”, Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 915.
6) M. Shoji, A. Nakamura, H. Miyashita, J. Minamino, **S. Furumiya**, T. Ishida, and H. Ishibashi: “High-Density Recording on a Phase-Change Rewritable Disk using a 405 nm Blue Laser Diode”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1687.
7) J. Minamino, M. Nakao, N. Kimura, M. Shouji, **S. Furumiya**, H. Ishibashi, and E. Ohno: “Practical Study of Saw-tooth Wobble Addressing by Theoretical and Experimental Approaches” , Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1741.
8) H. Miyashita, A. Nakamura, T. Nakajima, J. Minamino, **S. Furumiya**, and H. Ishibashi: “New Prml for Asymmetrical Signals in High-Density Optical Disks”, Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1787.
9) **S. Furumiya**, T. Fukushima, and Y. Yamazaki: “New Method of Calibrating Adaptive Writing Pulses for Digital Versatile Disc Random Access Memory (DVD-RAM) 4.7GB Drive”, Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 1694.
10) T. Shimada, K. Koishi, **S. Furumiya**, and S. Furukawa: “High Speed and High Density Recording in a Phase Change Rewritable Disk System”, Opt. Rev. **1** (1994) 180.

国際会議発表

1) **S. Furumiya** and Y. Fujiwara: “Laser Pulse Compensation Applied to Phase-Change Recording Film to Form Nano-Sized Marks”, 15th Int. Conf. on Thin Films 2011 (ICTF-15), O-S12-07, Kyoto, November 8-11 (2011).
2) **S. Furumiya**, H. Kitaura, K. Narumi, N. Miyagawa, and N. Yamada: “10x-Speed Recording on Dual-Layer Blu-ray Write-Once Media”, Int. Symp. on Optical Memory 2007 (ISOM2007), We-J-P03, Singapole, October 21-25 (2007).
3) **S. Furumiya**, K. Takahashi, H. Kitaura, N. Miyagawa, and N. Yamada: “Over 500Mbps Data Recording on Write-Once Media with L-Shaped Write Strategy”, Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage 2005 (ISOM/ODS2005), TuP26, Hawaii, July 10-14 (2005).
4) **S. Furumiya**, S. Kobayashi, B. Stek, H. Ishibashi, T. Yamagami, and K. Schep: “Wobble-Address Format of the Blu-ray Disc”, Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage 2002 (ISOM/ODS2002), WB.2, Hawaii, July 7-11 (2002).
5) **S. Furumiya**, J. Minamino, H. Miyashita, A. Nakamura, M. Shouji, T. Ishida, and H. Ishibashi: “Optical Disk Recording System of 25GB Capacity”, Optical Data Storage Topical Meeting 2001 (ODS2001), TuD2, 4342-96, New Mexico, April 22-25 (2001).
6) **S. Furumiya**, T. Fukushima, and Y. Yamazaki: “New Calibration Method of Adaptive Writing Pulses for DVD-RAM 4.7GB Drive”, Int. Symp. on Optical Memory 2000 (ISOM2000), Th-E-05, Hokkaido, September 5-8 (2000).
7) K. Koishi, **S. Furumiya**, H. Kitaura, T. Shimada, Y. Edahiro, T. Furutani, A. Kurahashi, and N. Yamada: “High Speed and Large Capacity Phase Change Rewritable Disk Recording for Digital Video”, Optical Data Storage 1994 (ODS’94), Dana Point, Proc. SPIE 2338 (1994) 137.

国内学会・研究会発表

1) 高岡友康、中村敦史、鳴海建治、古宮成、宮川直康: “前後スペース拡張型ライトストラテジによる３層 100GB 書換型光ディスク”, 電子情報通信学会, マルチメディアストレージ研究会, MR2009-49, 1 月 21 日 (2010).
2) **S. Furumiya**, H. Kitaura, K. Narumi, N. Miyagawa, and N. Yamada: “10x-Speed Recording on Dual-Layer Blu-ray Disc Write-Once Media”, The 19th Symp. on Phase Change Optical Information Storage PCOS 2007, Sesson 2-7, Novenver 29 (2007).
3) 古宮成、土生田晴比古、北浦英樹、土居由佳子、高橋克幸、中村敦史、宮川直康、西内健一、山田昇: “Te-O-Pd 材料を用いた高速・多層・高信頼性の BD-R メディア”, 電子情報通信学会, 磁気記録情報ストレージ研究会, MR2006-68, 1 月 18 日 (2007).
4) **S. Furumiya**, K. Takahashi, H. Kitaura, N. Miyagawa, and N. Yamada: “Over 500Mbps Data Recording on Write-Once Media with L-Shaped Write Strategy”, The 17th Symp. on Phase Change Optical Information Storage PCOS 2005, Sesson 3-9, Novenver 17 (2005).
5) 中嶋健、古宮成: “相変化光ディスクにおける PRML 信号処理方式の検討”, 電子情報通信学会, 磁気記録研究会, MR95-74, 12 月 8 日 (1995).
6) 古宮成、中嶋健、島田敏幸: “相変化光ディスクの高速マークエッジ記録 (2)パターン適応型マルチパルス記録方式”, 1994 春期第 41 回応用物理学関係連合講演会, 予稿集 No. 3, p. 998, 3 月 (1994).
7) 古宮成、小石健二、島田敏幸、山田昇、中嶋健、竹村佳也、北浦坦、倉橋章: “相変化ディスク用　高速記録レート・高密度記録方式の検討”, テレビジョン学会, 画像情報記録研究会, VIR93-83, 12 月 16 日(1993).

日本特許（登録）

	登録特許番号 出願（優先）日	発明の内容	発明者
1	特許第 4733234 号 （2008.10.09）	前後スペースを用いた拡張型パタン適応型記録補償	中村敦史, 小林勲, 古宮成
2	特許第 4836910 号 （2006.10.02）	追記型記録層に Te-O、保護層に Zn-O, Cr-O 等を含む光学媒体	北浦英樹, 土居由佳子, 古宮成, 西内健一, 山田昇
3	特許第 4759569 号 （2005.10.04）	高速再生時にレーザの高周波重畳を最適化する光ディスク再生方法	古宮成
4	特許第 4857264 号 （2005.03.31）	L-Shape ライトストラテジによるデータ記録方法	古宮成
5	特許第 4324230 号 （2003.04.04）	N/2 ライトストラテジによるデータ記録方法	中村敦史, 古宮成
6	特許第 4295518 号 （2002.01.21）	MSK と STW アドレスのハイブリッド検出方法	中尾政仁, 木村直浩, 古宮成, 南野順一, 石橋広通
7	特許第 4267901 号 （2001.11.21）	レファレンス STW による位相補正再生方式	南野順一, 中尾政仁, 古宮成, 石橋広通
8	特許第 4121265 号 2001.10.16	MSK+STW アドレスの光ディスクフォーマット	ｼﾞｬｯｸｽﾍｰﾑｽｶｰｸ, ｷｰｽｼｪﾌﾟ, ﾊﾞｰﾄｽﾃｯｸ, 田中伸一, 石橋広通, 古宮成, 小川博司, 山上保, 小林昭栄
9	特許第 4121264 号 2001.10.16	MSK＋STW アドレスの積分検出方法	ｼﾞｬｯｸｽﾍｰﾑｽｶｰｸ, ｷｰｽｼｪﾌﾟ, ﾊﾞｰﾄｽﾃｯｸ, 田中伸一, 古宮成, 小林昭栄, 小林伸嘉
10	特許第 4068330 号 2001.10.16	Saw-Tooth ウォブルの高調波次数振幅を規定した光ディスク媒体	ｼﾞｬｯｸｽﾍｰﾑｽｶｰｸ, ｷｰｽｼｪﾌﾟ, ﾊﾞｰﾄｽﾃｯｸ, 古宮成, 石橋広通, 南野順一, 小川博司, 増原慎, 佐野達史
11	特許第 3926688 号 （2001.07.19）	PRML の再生信号品質評価方法	中嶋健, 宮下晴旬, 古宮成, 石橋広通
12	特許第 4406665 号 （2001.06.20）	Saw-Tooth ウォブルと識別マークを併用した光ディスク媒体	石橋広通, 古宮成, 中村敦史, 南野順一, 石田隆
13	特許第 4104912 号	Saw-Tooth ウォブルとサブブロッ	石橋広通, 古宮成, 中村敦

	（2001.06.20）	クマークを併用した光ディスク媒体	史，南野順一，石田隆
14	特許第 4060308 号（2001.06.20）	Saw-Tooth ウォブルの基本波と 2 倍高調波を用いた再生方法	石橋広通，古宮成，中村敦史，南野順一，石田隆
15	特許第 4891419 号（2001.06.14）	Saw-Tooth ウォブルのブロック単位で記録を行う光ディスク媒体	中村敦史，南野順一，古宮成，東海林衛，石田隆，石橋広通
16	特許第 4906201 号（2000.09.07）	期待値制御による高精度レーザ駆動法	古宮成，千賀久司
17	特許第 3370322 号（2000.09.01）	ウォブルと識別マークを有する光ディスク媒体	南野順一，中村敦史，古宮成，石橋広通，石田隆，具島豊治
18	特許第 3370321 号（2000.09.01）	Saw-Tooth ウォブルと同期マークを有する光ディスク媒体	南野順一，中村敦史，古宮成，石橋広通，石田隆，具島豊治
19	特許第 3370320 号（2000.09.01）	Saw-Tooth ウォブルと識別マークを有する光ディスク媒体	南野順一，中村敦史，古宮成，石橋広通，石田隆，具島豊治
20	特許第 3370319 号（2000.09.01）	Saw-Tooth ウォブルを有する光ディスク媒体	南野順一，中村敦史，古宮成，石橋広通，石田隆，具島豊治
21	特許第 4520675 号（2000.08.31）	Saw-Tooth ウォブルが複数回繰り返された光ディスク媒体	中村敦史，南野順一，古宮成，東海林衛，石田隆，石橋広通
22	特許第 4309901 号（2000.08.31）	Saw-Tooth ウォブルを用いた光ディスク媒体	中村敦史，南野順一，古宮成，東海林衛，石田隆，石橋広通
23	特許第 4712890 号（2000.01.14）	Saw-Tooth ウォブルを全域ではなくセクタのいずれかの部分に複数サイクル設けた光ディスク媒体	古宮成，石橋広通，石田隆，小林良治
24	特許第 4458735 号（2000.01.14）	Saw-Tooth ウォブルを複数回繰り返して用いる基本特許	古宮成，石橋広通，石田隆，小林良治
25	特許第 4448162 号（2000.01.14）	Saw-Tooth ウォブルの鋸歯形状を定めた基本特許	古宮成，石橋広通，石田隆，小林良治

26	特許第 4075185 号 1999.01.29	再生群遅延を平滑化してから記録補償条件を求める	宮川直康, 石田隆, 南野順一, 小石健二, 古宮成
27	特許第 4553968 号 （1998.11.06）	ジッタ最小法によるパタン適応型記録補償条件の自動最適化	古宮成, 南野順一, 東海林衛
28	特許第 4413432 号 （1998.08.20）	ウォブルを用いた R-OPC レーザーパワー制御の光ディスク装置	井口睦, 古宮成, 宮端佳之, 久門裕二, 宮崎篤史, 赤木俊哉
29	特許第 4178267 号 （1997.12.15）	CAPA アドレスの再生信号処理方法	古宮成, 久門裕二
30	特許第 3090662 号 （1996.04.15）	CAPA アドレスを有する光ディスクと記録再生装置	竹村佳也, 古宮成, 石田隆, 青木芳人, 大原俊次, 上岡優一, 具島豊治
31	特許第 3090661 号 （1996.04.15）	CAPA アドレスを有する光ディスクと記録再生装置	竹村佳也, 古宮成, 石田隆, 青木芳人, 大原俊次, 上岡優一, 具島豊治
32	特許第 3073205 号 （1996.04.15）	CAPA アドレスを有する光ディスクと記録再生装置	竹村佳也, 古宮成, 石田隆, 青木芳人, 大原俊次, 上岡優一, 具島豊治
33	特許第 3073204 号 （1996.04.15）	CAPA アドレスを有する光ディスクと記録再生装置	竹村佳也, 古宮成, 石田隆, 青木芳人, 大原俊次, 上岡優一, 具島豊治
34	特許第 3802189 号 （1996.04.11）	CAPA の和信号／差信号の再生等化条件	宮川直康, 東海林衛, 石田隆, 古宮成, 久門裕二
35	特許第 3539524 号 1995.12.12	分流型高速レーザ駆動回路	古宮成
36	特許第 3301691 号 1995.12.05	ビタビ復号結果でレベル補正と PLL を行う PRML 信号処理	中嶋健, 古宮成, 竹村佳也
37	特許第 3331818 号 1995.06.22	ビタビ復号結果でレベル補正と PLL を行う PRML 信号処理	中嶋健, 古宮成, 竹村佳也
38	特許第 2679596 号 1993.11.09	パタン適応型記録補償方式の基本特許	古宮成, 中嶋健, 竹村佳也
39	特許第 2684952 号 1993.04.07	FLC（First, Last, Cooling）パルス構成の 3 値ライトストラテジ	古宮成, 中嶋健, 竹村佳也

米国特許（登録）

発明の内容は日本特許に準じる

	特許番号		特許番号		特許番号
1	US 8,274,873	31	US 7,269,117	61	US 6,577,590
2	US 8,270,542	32	US 7,269,116	62	US 6,510,116
3	US 8,259,556	33	US 7,257,073	63	US 6,469,980
4	US 8,247,058	34	US 7,248,552	64	US 6,456,585
5	US 8,223,609	35	US 7,236,438	65	US 6,438,096
6	US 8,149,673	36	US 7,167,438	66	US 6,396,778
7	US 8,133,655	37	US 7,145,843	67	US 6,195,320
8	US 8,111,599	38	US 7,123,557	68	US 6,172,960
9	US 8,072,857	39	US 7,116,630	69	US 6,172,952
10	US 8,064,308	40	US 7,116,624	70	US 6,044,051
11	US 7,990,820	41	US 7,075,883	71	US 5,850,378
12	US 7,961,581	42	US 7,068,589	72	US 5,831,951
13	US 7,933,170	43	US 7,035,189	73	US 5,793,786
14	US 7,848,216	44	US 7,027,374	74	US 5,719,843
15	US 7,826,314	45	US 6,999,404	75	US 5,636,194
16	US 7,782,743	46	US 6,999,391	76	US 5,490,126
17	US 7,697,406	47	US 6,922,384		
18	US 7,656,780	48	US 6,912,185		
19	US 7,596,076	49	US 6,898,175		
20	US 7,593,314	50	US 6,894,965		
21	US 7,593,313	51	US 6,804,190		
22	US 7,564,758	52	US 6,791,926		
23	US 7,551,536	53	US 6,757,239		
24	US 7,529,167	54	US 6,738,342		
25	US 7,474,607	55	US 6,724,708		
26	US 7,474,606	56	US 6,674,700		
27	US 7,376,056	57	US 6,665,250		
28	US 7,362,664	58	US 6,642,952		
29	US 7,327,660	59	US 6,621,779		
30	US 7,315,497	60	US 6,608,810		