レーザー解説

光 記 録 シ ス テ ム[†]
— 高密度情報記憶と検索 —

Robert A. Bartolini*

(1983年 3 月17日 受理)

Optical Recording[†]

— High Density Information Storage and Retrieval —

Robert A. BARTOLINI*

(Received March 17, 1983)

1. はじめに

今日の社会では、大量の情報を記憶し、これを高速度で検索する必要性が常に高まりつつある。これらの情報としてはコンピュータのデジタルデータからアナログのFMビデオ信号まで広範な形態が考えられ、その記録には経済的で小型・高速度の大容量記憶媒体が必要である。又、その検索にはデータ内の選択されたセグメントへの高速度なランダムアクセスが要求される。つい最近までは磁気記憶などの従来からの記録技術はその絶え間ない発展により情報記録・検索の必要の増大に対応することができた。しかし現在では、磁気記憶を更に改善することがますます困難となるような時点にきているように思われる。しかし幸いなことに魅力ある新しい技術、すなわち微細に集光したレーザー光を用いたディスクへのデータの光学的記録法がこの問題の解決策として出現して来ている。直径30cmの光ディスク1枚当り 10^{11} ビットの容量を

もち、単一チャンネルで50Mbits/sec, 多チャンネルで320Mbits/secのデータ速度のシステムが報告されている。^{1,2)} 今日ではプレイバックのみが可能な光ディスクシステムは商品化されており、これらについては文献3, 4に述べられている。本文では記録および記録された情報の再生(プレイバック)の両方が可能な光ディスク・データ記録システム^{5,6)}について述べる。

以下の各項では、光ディスク記録・再生装置の重要な特徴について、特にこの種のシステムの二つのキーエレメント、すなわち記録用レーザー光源と記録媒体に重点を置いて述べる。

光ディスク記録システムは次のような特長を持っている。

1. 情報密度が非常に高い(ディスク当り 10^{10} ~ 10^{11} ビットが得られている)。
2. データ速度が非常に速い(単一チャンネルの記録装置で50Mbits/secまで得られている)。
3. データへの高速($\ll 1$ sec)ランダムアクセ

*RCA Laboratories (Princeton, NJ 08540, USA)

†エレクトロ-optics/レーザー'83(主催:レーザー学会, CEGジャパン)セミナープログラムより転載。

Fig. 1 Schematic of Optical Disc Recording and playback apparatus.

スが実現されている。

4. 媒体のコストは低く、 5×10^{-8} cent/bit程度になると予想されている。

5. 媒体はデータの(10年かそれ以上の)永久的な記録(Archival storage)に使用できる可能性を持っている。

このため、数多くの機関が数年来、光ディスク記録装置の開発を活発に行なって来た。⁷⁻¹⁵⁾ 開発された種々の記録媒体には大きな差異があるが、数ヶ国の異なる場所で独自に開発されたそれぞれのシステムにも多くの共通点がある。Fig. 1は典型的な光ディスク記録・再生システムのブロックダイアグラムを示したものである。

記録光源はどの光ディスク記録システムでもレーザーに周辺の光学系を加えたものを用いている。その光学系はディスクの表面上に必要な記録ビームを形成するとともに、そのビームをディスク表面に導きこれからの反射光を読出し用光検出器に導くことができるものでなければならない。

2. 光記録用レーザーと光学系

Table I には光ディスクシステムの記録光源として広く用いられている市販のレーザー(およびその特性)のリストを示す。光記録への応用ではそれぞれの場合に応じて適当なレーザーが選ばれて使用される。例えば、He-Cdレーザーは最短の波長の光を発生するので記録エレメント

Table I Lasers for optical recording (CW single mode)

Type	λ (nm)	$(d_{1/2p}(\mu\text{m}) \text{ NA}=0.85)$	P output (max)
HeCd	422.	0.29	40mW
Ar ⁺	488.	0.32	1-4 W
HeNe	633.	0.42	50mW
AlGaAs	820.	0.54	40mW

は最小となり、ディスクのデータ容量および単一チャンネルでの記録速度は最高の値を得ることができる。一方、Ar⁺レーザーは高出力であるのでその出力ビームを分割して数本(9本までが報告されている²⁾)のサブビームとし、これを独立に変調してデータの同時記録を行ない、単一チャンネルの場合のn倍(nはサブビーム数)のデータ速度を得ることができる。又、He-Neレーザーは入手容易で寿命・信頼性が実証されているため光ディスク記録光源としても魅力あるものとなっている。

He-Cdレーザー、Ar⁺レーザー、He-Neレーザーは全て気体レーザーであり、最近まではこれら気体レーザーのみが光記録に応用されていた。しかし高感度光記録媒体の開発と、GaAlAs半導体ダイオードレーザーのモード特性および出力パワーの改善が絶え間なく行なわれた¹⁶⁾結果、これら半導体光源を用いたビデオ情報の記録^{17,18)}やデジタル情報の記録^{17,19)}が可能となった。

光記録用としてのダイオードレーザーには50

Fig. 2. Lateral mode far-field pattern for CDH-LOC laser.

%のデューティ比で40mW以上のピークパワーと30MHzまでの高速動作が要求される。更に光軸に対して垂直な2方向に関して安定な基本モードの動作をする必要がある。

最近開発された新しい構造 (Constricted double heterojunction large optical cavity; CDH-LOC²⁰⁾) のダイオードレーザーは安定な単一モード動作で高出力パワー (100mW) であり、長寿命 (40mW, 50%デューティ, 10MHzの動作で10000時間以上) なことが期待されている。このCDH-LOC型のレーザーはFig.2に示すような横モード (lateralモード) の遠視野パターンで表わされる典型的な特性を持っている

る。このレーザーは、幅8~100nsecデューティ10%のパルス動作からCW動作までの駆動条件および5~50mWの出力パワーの広い範囲にわたって、非常に再現性の良い空間モード特性を示す。遠視野像の変化は記録レンズを用いたときその開口内には入らないようなモード外周部のみで生じる。

光記録システムに用いられる光学系は、レーザーの種類、記録の形式 (デジタル又はアナログ)、記録ビーム数など幾つかのファクターにより異なったものとなる。例として記録光源にダイオードレーザーを用いた光ディスク記録システムについて述べる。Fig.3はそのようなダイオードレーザーを用いた光記録システムを示したものである。光学系が調整された状態では、ほぼ回転対称なビームが集光用の対物レンズ

Fig. 3 Diode laser optical recording system.

Fig. 4 Diode laser recording and playback system.

($NA=0.85$) のちょうど全面に入射し、光軸に垂直な2方向について $0.6\mu m$ の大きさ(半値パワー直径)の集光スポットが得られる。

データはリアルタイムで記録され、同時プレイバックを行うことができるので、データが誤りなく記録されていることを確認するための read-after-write (RAW) 方式をとることができる。これにはFig.4に示したように別の低出力のレーザーを用いることができる。Fig.3のダイオードレーザーとその光学系に加えて、Fig.4ではHe-Neレーザーが焦点調整、トラッキング、RAW および最終的なデータ読出しを行うために用いられている。このシステムおよび気体レーザーを用いたシステムによる記録の結果については本文中で後に述べる。

3. 記録媒体

光ディスクデータ記録・検索システムのキーコンポーネントは記録媒体である。記録用レーザービームからの光吸収により光学的性質の変化が生じるような材料には多くの種類がある。²¹⁾ 光記録に最も適したものと考えられる材料の種類は、融解や蒸発により材料が部分的に消失するような薄膜である。微細に集光したレーザービームは極度に局在化した強力な熱源として働く。このような熱的記録プロセスではFig.5に示すように薄膜が集光されたレーザービームにより局所的に加熱され、融解した領域では表面張力のため小穴(ピット)がけられる。データ

Fig.5 Media thermal recording process.

Fig.6 Optical characteristics of the trilayer structure.

を読み出すには、無変調のレーザービーム(記録時の強度レベル以下)をディスクの回転によりピット上を走査し、ピットの有無を反射率の変化として検出することによりデータ出力信号を得る。

Fig.6に示すような三層構造の記録媒体には金属膜が用いられている。^{22, 23)} これは基板上に最初にアルミニウムの反射層、次に透明な誘電体層、最後に金属の記録材料の非常に薄い層を埋積したものである。誘電体層の厚さと薄い金属膜を適当に選ぶことにより、記録光の波長に対して無反射の条件を満たすことができ、その結果入射ビームのエネルギーの大部分(最大90%)が金属薄膜内に吸収される。単層構造の媒体では反射と単層膜を通しての一部透過のため光の損失があるが、三層構造の媒体ではこのようにして光の結合効率が単層構造の2倍にまで高められている。また三層構造の媒体では、記録により形成されたピットはアルミニウムの反射層が露出して高反射率となるのに対し、ピットの無い部分では無反射条件が保持されているので、読出し時の信号コントラストは高く、この点でも単層構造の媒体より優れている。

三層構造の媒体における材料消失モードによるピット形成(Fig.7a)以外に、最近2つの新しく興味深い記録モードが報告されている。そのひとつはバブル形成モード^{24, 25)}(Fig.7b)である。このモードでは吸収層は低融点金属(テルルなど)ではなく高融点金属(チタンなど)が用いられ、誘電体層には吸収層の融点よりかなり低い気化点をもつ材料が選ばれている。微細に集光されたレーザービームが照射されると、

Fig. 7 Trilayer recording modes.

表面の吸収層がその下の誘電体層の酸化によるガス圧のため盛り上がるのでバブルが形成される (Fig. 7b)。このバブルは無反射条件を成立させなくするので、従ってピット形成モードと同様の読み出しが行なえる (反射率は書き込みを行った領域で高く、書き込まれていない領域で低い)。もう一つの新しいモードは Fig. 7c に示す可逆的な記録モード²⁶⁾である。このモードでは記録に際してピットやバブルのような三層構造内の形状的な変化は生じない。代わりに、書き込まれた領域では材料が結晶状態と非晶質 (アモルファス) 状態の間の相遷移を起こし光学的特性が変化する。この場合 Fig. 7c のように誘電体の保護膜が被着されているのでピット形成モードの変化は起こらない。記録された情報は、これを高いパワー (但し記録ビームのパワーよりは小) で読み出しを続けることにより消去する (最初の状態を再書き込みする) ことができる。その部分は何度も再書き込みと消去を繰り返すことができ、50回までの記録・消去の繰り返し報告されている²⁶⁾。

4. プレイバックと記録媒体欠陥

以上では光記録媒体の構成の材料に関する面について述べたが、欠陥があった場合のプレイバック信号の品質への影響については無視してきた。しかし情報密度が非常に高いため、 $1\mu\text{m}$ 程度の大きさの欠陥でも脱落する情報量は無視できない。このような欠陥の生じる原因には基本的には3種類あり、光記録ディスクの設計はこれらの全てを考慮に入れて行なう必要がある。

多分最も重要な第1の欠陥は、記録媒体の表面上に凝結した塵の粒子が時間とともに集積してできるものである。このような粒子は、記録されたピットの幾つかを検出不能にしたり、記録時にピットの形成を不能にする。しかし比較的厚い ($180\mu\text{m}$) 透明な表面保護層を設ければ、このような欠陥の原因となる塵を焦点から離すことになるので、信号の劣化を防止することができる²⁷⁾ Fig. 8はそのような表面層を持つテルを用いた三層構造の媒体を示したものである。

第2の欠陥は記録媒体を構成する真空蒸着膜自体の品質に関連するものである。これらの被膜はピンホールが極端に少ないものでなければならず、蒸着プロセスには最も高度なクリーンさが要求される。

第3の欠陥はディスク基板の表面の欠陥によるものである。たとえ最も丹念に研磨したガラス基板でも、その表面には空洞や微小な傷が有限の密度で存在するし、安価なプラスチック基板の場合には欠陥密度はかなり高いと思われる。

Fig. 8 Overcoated Te-trilayer structure with subbed substrate.

しかし基板表面の欠陥は、基板を液状のプラスチック材料により薄くプリコートすることにより比較的容易に除去することができる。プリコート層はスピナーにより塗布されるが、これが乾燥する時には表面張力により表面は記録媒体層の埋積に適した殆んど欠陥のない状態で固体化する。Fig.8にはこのような下地層 (Subbing layer) も示されている。

Fig.3のような半導体レーザーを用いた記録光学系とFig.6に示した構造の光ディスクによる記録の結果をFig.9, 10に示す。Fig.9は半導体レーザーによる記録システム¹⁷⁾を用いて記録し再生したプレイバックビデオ信号をTVモニターにディスプレイしたものの写真である。

Fig.10は同システム¹⁷⁾を用いたデジタル信号の記録結果である。Fig.10aに示す入力ビットパターンに対応して遅延変調 (DM) した20Mbit/sec のデジタル信号波形により半導体ダイオードレーザーを直接変調しており、プレイバックによりFig.10bに示す出力信号が得られている。

高出力 (～1 W) のAr⁺レーザーを用いてその出力ビームを複数のサブビームに分割し、これを独立に変調することにより、デジタルデータの125～320 Mbits/secの高速・同時記録が行われている。Fig.11はFig.6の光ディスクを用いた3チャンネル125Mbits/sec (1チャンネル

Fig.9 Photograph of TV monitor playback of video signal recorded and read-out with a diode laser.

Fig.10 Diode laser recording and playback of a 20Mbit/s DM digital signal. (a) Input bit pattern and DM waveform. (b) Output DM signal.

1.25 μ m

Fig.11 SEM Playback of 3 channel (125 Mbits/sec) optical disc recordings.

4.44 μ m

Fig.12 Microscope Photograph of 9 channel (320 Mbits/sec) optical disc recordings.

当り41.67Mbits/sec) のデジタルデータ記録の走査電子顕微鏡写真を示す。トラック間隔は1.25 μ mでありトラック幅は約0.4 μ mである²⁾。Fig.12は同じFig.6の光ディスクによる9チャンネル320Mbits/sec (1チャンネル当り35.56 Mbits/sec) のデジタルデータ記録の顕微鏡写真である。データはほぼランダムな遅延変調されたデジタルパターンである²⁾。

Fig.13 Photograph of TV monitor playback of reversible recordings

a) recording #1, b) recording #30, and c) recording #50.

Fig.7cの光ディスク構造を用いて、ビデオ信号の書き換え可能な光記録が行われている²⁶⁾。

Fig.13はディスクのあるトラック上で記録/消去/再記録を繰り返したときの1回目、30回目および50回目のビデオ信号の記録をプレイバックしたものの写真を示す。

5. むすび

光データ記録・再生システムが話題となり始めてから10余年が経過した。最近の発展（高出力単一モードダイオードレーザー，多チャンネル高データ速度システム，単一チャンネル低データ速度の基本システム，およびユーザーのニ

ーズ）により1983—1985年内での生産開始の可能性が高まった。製品化システムの性能としては，低データ速度（10～20 Mbits/sec）・単一ディスク（ 10^{10} ～ 10^{11} bits）のランダムアクセス電子オフィスファイルキャビネット（現在のワードプロセッサユニットの拡張）から，高データ速度（数100 Mbits/sec）・多ディスク（ 10^{13} bits, on line “Jukeboxes”）のランダムアクセス大容量固定記録装置までが考えられている。

参 考 文 献

- 1) G. J. Ammon, C. W. Reno, and R. J. Tarzaiki, “Digital Optical Video Disc,” Final Report Government Contract F30602-78-C-0050, Rome Air Development Center, April 1979.
- 2) G. J. Ammon and C. W. Reno, “Optics for Multi-Beam Optical Disc System,” Proc. SPIE, Vol. 299, 1981.
- 3) D. Mennie, “Television on a Silver Platter,” IEEE Spectrum, pp. 34—40, August 1975.
- 4) The July 1, 1978 issue of Applied Optics features seven articles on “Video Long Play Systems.”
- 5) R. A. Bartolini, A. E. Bell, R. E. Flory, M. Lurie and F. W. Spong, “Optical Disk Systems Emerge,” IEEE Spectrum, 15, pp. 20—28, August 1978.
- 6) G. C. Kenney, D. Y. K. Lou, R. McFarlane, A. Y. Chan, J. S. Nadan, T. R. Kohler, J. G. Wagner and F. Zernike, “An Optical Disk Replaces 25 Mag Tapes,” IEEE Spectrum, 16, pp. 33—38, February 1979.
- 7) K. Berger and H. J. Hamisch, “Laser Picture Storage System for Professional Applications,” Ferneseh Aktuell, pp. 10—16, February 1977.
- 8) K. Broadbent, “A Review of the MCA Disco Vision System,” J. SMPTE 83, pp. 554—559, July 1974.
- 9) R. Pepperl and I. Sander, “High Density Direct Read and Write (DRAW) Recording,” Optica Acta 24, pp. 427—431, 1977.
- 10) G. Kenney, D. Lou, J. Wagner, F. Zernike, R. McFarlane, and A. Chan, “Experimental Optical Disc Data Recorder,” Conference on Laser and Electro-Optical Systems (CLEOS), San Diego, CA, February 1978.
- 11) M. Lurie and R. E. Flory, “Developing a Broadcast Quality Optical Video Disc System,” CLEOS, San Diego, CA, February 1978.
- 12) Y. Naruse and A. Ohkoski, “A New Optical Video Disc System with One Hour Playing Time,” IEEE Chicago Spring Conference on Consumer Electronics, June 1978.

- 13) E. Spitz, "Optical Video Discs," Conference on Laser Engineering and Applications (CLEA), Washington, DC, May 1975.
- 14) F. Le Carvenec, "Professional Applications of Optical Video Disc Technology," CLEOS, San Diego, CA, February 1978.
- 15) P. Palermo, A. Korpel, G. Dickinson, and W. Watson, "Video Disc Mastering and Replication," Optics and Laser Technology, pp. 169—174, August 1977.
- 16) D. Botez, F. W. Spong and M. Ettenberg, "High-Power Constricted Double-Heterojunction AlGaAs Diode Lasers for Optical Recording," Appl. Phys. Lett., **36**, no. 1, pp. 4—6, 1980.
- 17) R. A. Bartolini, A. E. Bell and F. W. Spong, "Diode Laser Optical Recording Using Trilayer Structures," J. Quantum Electronics, **17**, no. 1, pp. 69—77, 1981.
- 18) P. M. Asbeck, D. A. Cammack, J. J. Daniele, D. Lou, J. P. J. Heemskerk, W. J. Kluters and W. H. Opey, "High-Density Optical Recording with (GaAl)As DH Lasers," Appl. Phys. Lett., **34**, no. 12, pp. 835—837, 1979.
- 19) K. Bulthuis, M. G. Carasso, J. P. J. Heemskerk, P. J. Kivits, W. J. Kleuters and P. Zalm, "Ten Billion Bits on a Disk," IEEE Spectrum, **16**, pp. 26—33, August 1979.
- 20) D. Botez, "CW High Power Single Mode Operation of Constricted Double-Heterojunction AlGaAs Lasers with a Large Optical Cavity," Appl. Phys. Lett., **36**, no. 3, pp. 190—192, 1980.
- 21) R. A. Bartolini, H. A. Weakliem and B. F. Williams, "Review and Analysis of Optical Recording Media," Optical Engineering, **15**, pp. 99—108, 1976.
- 22) A. E. Bell and F. W. Spong, "Antireflection Structures for Optical Recording," J. Quantum Electronics, **14**, pp. 487—495, 1978.
- 23) A. E. Bell and R. A. Bartolini, "High Performance Te-Trilayer for Optical Recording," Appl. Phys. Lett., **34**, no. 4, pp. 275—276, 1979.
- 24) J. Cornet, J. C. Leheureau, and F. Le Carvenec, "Characteristics and Performance of a Novel Recording Material," Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Washington, DC, June 1981.
- 25) W. Robbins, R. Freese, T. Smith and R. Willson, "Bubble Forming Media for Optical Recording: A New Approach," Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Washington, DC, June 1981.
- 26) A. E. Bell and F. W. Spong "Reversible Optical Recording in Trilayer Structure," Appl. Phys. Lett., **38**, pp. 920—921, 1981.
- 27) A. E. Bell, R. A. Bartolini and F. W. Spong, "Optical Recording with the Encapsulated Titanium Trilayer," RCA Review, **40**, pp. 345—362, 1979.