

# マイクロホログラムを用いた位相多値記録方式

井手 達 朗

## Multilevel Phase Modulation Recording Method by Using Microholographic System for a High-Density Optical Disk

Tatsuro IDE

Optical phase multilevel recording method by using microholographic system and phase-diversity homodyne detection for enhancement of optical disk capacity is investigated. This method adds an extra "phase" dimension to conventional three-dimensional microholographic recording system, by modulating fringe position in writing and detecting the modulated optical phase by phase-diversity homodyne detection in readout. After the introduction of our concept, several experimental and numerical results to demonstrate the feasibility of the proposed method are described.

**Key words:** optical disk, multilevel recording, multilayer recording, microhologram, optical phase modulation, homodyne detection

ホログラフィーが光の干渉を利用した波面の記録技術として1948年にGabor<sup>1)</sup>によって開発されてからほぼ半世紀後の1997年、マイクロホログラムとよばれるビットバイビットでホログラムを記録する方式がEichlerによって提案された<sup>2)</sup>。マイクロホログラムとは、2つの対向するレーザー光、いわゆる信号光と参照光をホログラム媒体の両側から対物レンズで同一焦点へ集光して干渉させ、微細な反射型ホログラムとして情報を記録する方式である。再生過程では、従来の光ディスクと同様に、マイクロホログラムからの反射光を読み出す。媒体厚さ方向の焦点位置を変えることで、物理的な層構造のない媒体中に仮想的な多層記録を行うことが可能であることから、2008年には堀籠らが10層のマイクロホログラムの記録実験を報告するなど<sup>3)</sup>、Blu-ray Disc (BD)に続く次世代の大容量光ディスク技術として注目されている。

一方、光ディスクを大容量化する別の方法として、多値記録がある。多値記録は、光の複数の振幅(強度)や位相、偏光状態などを用いて、情報を担う1つのマークに複数ビットを記録する方式である。光通信の分野では活発に研究されており、四値の位相多値変調であるDQPSK(differential quadrature phase shift keying; 差動四値位相変

調)方式がすでに実用化されている<sup>4)</sup>。また、研究フェーズでは512値もの振幅位相多値変調である512 QAM<sup>5)</sup>(quadrature amplitude modulation; 直交振幅変調)の実現可能性も示されている。光ディスクの分野では、2000年ごろに米国Calimetric社などによりCDやDVDでの振幅多値が試みられた<sup>6)</sup>。しかし、従来は「0」「1」信号の2値を割り当てていたダイナミックレンジに3値以上を割り当てる方式であったため、再生信号のSN比が低下するという問題があった。また、光学分解能程度のマークの大きさや反射率を制御して「0」と「1」の間の中間レベルを実現する方式であったため、3値以上の振幅状態を明確に分離して記録するのが容易でないという問題もあった。その後のBDの登場により、光ディスクでは多値化技術の実用化には至らなかった。

光通信の分野では光の位相を多値変調して実用化に結び付けている状況に鑑み、筆者らはマイクロホログラムを応用した位相多値記録方式と光通信の分野で知られている位相ダイバーシティ・ホモダイン検出<sup>7)</sup>を用いた再生方式を融合させて、光ディスクのさらなる大容量化を図る新たな多値記録再生方式を提案した<sup>8)</sup>。本稿では、マイクロホログラムを用いた位相多値記録再生の試みについて紹介する。

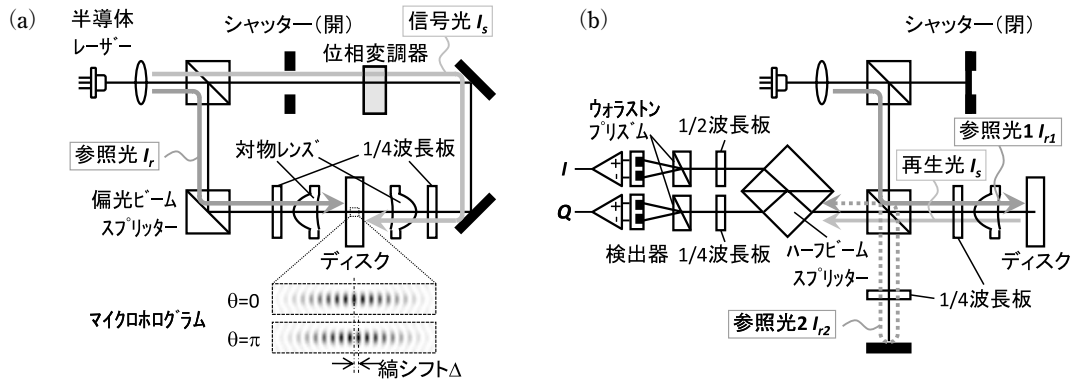


図1 マイクロホログラムを用いた位相多値記録方式の光学系。(a)記録,(b)再生。

## 1. 位相多値記録方式の原理

### 1.1 記録過程

マイクロホログラムを用いた位相多値記録方式の原理を、図1を用いて説明する。記録時は従来のマイクロホログラムと同様に、2つの対向するレーザー光をホログラム媒体の両側から対物レンズで集光する。このとき、信号光の光路中に位相変調器を配置して信号光の位相 $\theta$ を $0\sim 2\pi$ で多値変調すると、干渉縞の強度分布が

$$\Delta = (\theta/2\pi) \cdot (\lambda/2n) \quad (1)$$

だけ光軸方向にシフトする。式(1)において、 $\lambda$ はレーザー光の波長、 $n$ はホログラム媒体の屈折率である。つまり、多値変調した信号光の位相情報は、位相 $\theta$ に比例した干渉縞のシフト量 $\Delta$ として記録される。位相 $\theta$ と干渉縞のシフト量 $\Delta$ が線形関係のため、中間レベルの実現が容易で、安定した多値記録が可能である。例えば信号光の位相 $\theta$ を $2^N$ 値で変調すると、光軸方向の強度分布が $\lambda/(2^N n)$ ずつずれたマイクロホログラムが記録され、1マイクロホログラムあたり $N$ ビットの情報を表現できる。ここで、干渉縞の強度分布は波長オーダーで光軸方向にシフトするが、マイクロホログラムの位置は位相変調によらず二光束の焦点位置で変わらないため、位相多値記録と多層記録とは両立が可能である。

### 1.2 再生過程

再生時は参照光を2つに分岐し、参照光1を従来のマイクロホログラムと同様ホログラム媒体に照射すると、マイクロホログラムによる反射光が再生される。この再生光を参照光2と偏光方向が直交した状態で合波した後、位相ダイバーシティー・ホモダイン検出によって2つの信号 $I, Q$ を得る。再生光、参照光2の強度をそれぞれ $I_s, I_{r2}$ とすると

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_{r2} \cdot I_s} \cos\theta \\ Q &= \sqrt{I_{r2} \cdot I_s} \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

となる<sup>7)</sup>。これら2つの信号 $I, Q$ の二乗和から参照光によって増幅された強度信号 $I_{r2} I_s$ が得られると同時に、

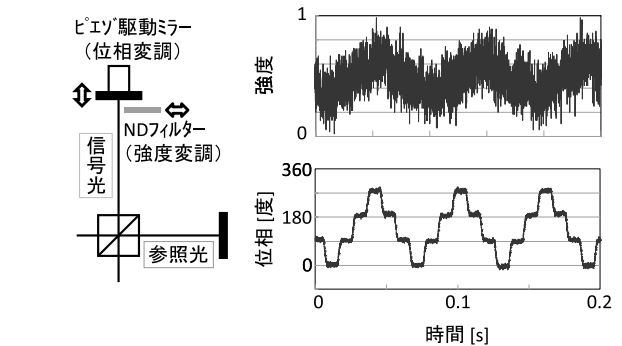


図2 原理実験による四値変調信号再生実験結果<sup>8)</sup>。

$\tan^{-1}(Q/I)$ から干渉縞のシフト量としてマイクロホログラムに変調記録された位相信号 $\theta$ を抽出することができる。

この方式では、多値化技術により光ディスクの大容量化が図れることに加えて、ホモダイン検出を用いて再生光を増幅することにより、高SN比再生を実現できることも特徴である。

## 2. 位相再生実験

### 2.1 原理実験

まずは方式の原理検証のため、 piezo駆動ミラーとNDフィルターを用いて位相と強度を独立に四値変調した信号光の再生実験を行った。各信号の雑音に対する耐性を比較するため、レーザーを閾値付近で発光させたり、出力パワーをNDフィルターで弱めたりして、レーザー雑音や増幅器雑音を意図的に増強した状態で測定した(図2)。

従来の強度検出の場合、信号光強度が弱く増幅器雑音が支配的となっており、四値レベルの判別はほとんど不可能である。一方、位相検出の場合、ホモダイン検出によって信号が増幅されるため、信号光強度に対して増幅器雑音が相対的に抑圧されている。また、位相抽出の際に式(2)で $\tan^{-1}(Q/I)$ を取るとレーザー雑音を含む $I_s, I_{r2}$ が相殺されるため、SN比が大幅に改善し、容易に四値レベルの識別が可能になっている。以上の結果より、本方式が従来よりも高いSN比での再生が可能であり、多値変調に適し

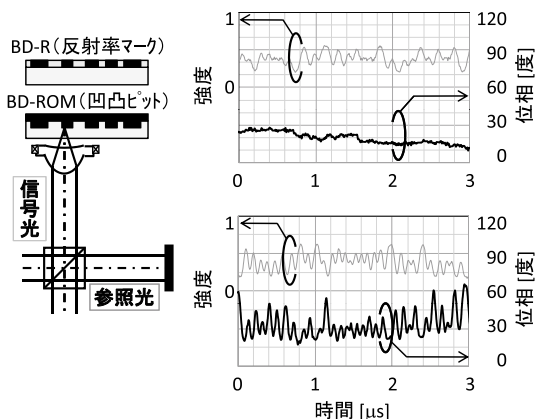


図3 BDを用いた位相信号再生実験結果<sup>9)</sup>。上：BD-R, 下：BD-ROM.

ていることが示された。

## 2.2 Blu-ray Disc を用いた再生実験

次に本方式の光ディスクへの適用可能性を検証するため、BD-ROM と BD-R からの位相信号再生実験を行った<sup>9)</sup> (図3)。ROM ディスクはピットとよばれる凹凸構造によって情報が記録されており、ピットの有無によって信号光の光路長が変化する。一方、R ディスクは相変化材料の屈折率変化等によって情報(マーク)が記録されており、マークの有無による信号光の光路長変化はほとんどない。

強度信号をみると、BD-R、BD-ROM ともにピットやマークによる変調がみられる。一方で位相信号をみると、BD-R ではディスクの面ぶれによる低速のゆらぎを除いてマークによる変調がほとんどみられないのに対し、BD-ROM では強度変調と同期して変調しているのがわかる。以上の比較から、光路長変化による光ディスクからの信号光の位相変調を位相ダイバーシティ・ホモダイン検出によって検出できることが確認できた。しかし、BD のように光学分解能程度のピット長の変調で情報を記録する場合、光スポットはピット外の領域も照射しピット周辺からの反射光がクロストークとなるため、ピットの深さが一定でもピット長によって検出される位相が異なることがわかった。

## 2.3 マイクロホログラムの位相信号計算

BD と同様の光学条件 ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ , 対物レンズ開口数  $NA = 0.85$ , トラックピッチ  $0.32 \mu\text{m}$ ) でランダムに記録されたマイクロホログラムを仮定し、位相ダイバーシティ・ホモダイン検出による位相信号の計算を行った(図4)。BD との比較のため信号光の位相変調は行わず、 $\theta = 90^\circ$  で一定と仮定した。強度信号をみると、BD と同様にマイクロホログラムによる変調がみられた。一方で位相信号をみると、2つのホモダイン信号  $I$ ,  $Q$  が微弱で  $\tan^{-1}$

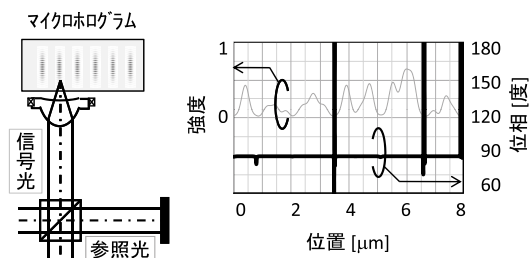


図4 マイクロホログラムの位相信号再生結果<sup>9)</sup>。

( $Q/I$ ) の値が不定となる位置以外では、 $90^\circ$  で安定した位相信号が得られることが確認できた。マイクロホログラムの場合はBD と異なり、マーク周辺が透明で周辺からのクロストークがないため、マーク長によらず安定した位相信号が得られたと考えられ、マイクロホログラムを用いた位相記録方式が多値化には適しているといえる。

光ディスクにおける多層化および多値化技術は、今後有望な大容量化技術のひとつである。本報告では、新しい多値化方式として筆者らが提案したマイクロホログラムと位相ダイバーシティ・ホモダイン検出方式を融合した位相多値記録方式の最近の成果を紹介した。本方式でどこまで多値度を高めることができるかが、今後の検討課題である。

## 文 献

- 1) D. Gabor: "A new microscope principle," *Nature*, **161** (1948) 777-778.
- 2) H. J. Eichler, S. Diez, R. Elschner, R. Macdonald, R. Schulz and A. G. Wappelt: "High-density disc storage by multiplexed microholograms," *Proc. SPIE*, **3109** (1997) 239-244.
- 3) T. Horigome, K. Saito, H. Miyamoto, K. Hayashi, G. Fujita, J. Yamatsu, N. Tanabe, S. Kobayashi and H. Uchiyama: "Recording capacity enhancement of micro-reflector recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47** (2008) 5881-5884.
- 4) 太田篤伸, 谷村大輔, 客野智彦, 飯尾晋司: "長距離光伝送システム向け 43 Gbps RZ-DQPSK トランスポンダ", *横河技報*, **52**, No. 3 (2008) 77-80.
- 5) S. Okamoto, K. Toyoda, T. Omiya, K. Kasai, M. Yoshida and M. Nakazawa: "512 QAM (54 Gbit/s) coherent optical transmission over 150 km with an optical bandwidth of 4.1 GHz," *Proceedings of 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)* (2010) pp. 1-3.
- 6) K. Balasubramanian, H. Hieslmair, D. Lee and M. O'Neill: "Multilevel-enabled double-density DVD (re)writable," *Technical Digest of Joint International Symposium on Optical Memory & Optical Data Storage (ISOM/ODS)* (2002) pp. 434-435.
- 7) H. Mikami, T. Shimano, H. Kudo, J. Hashizume and H. Miyamoto: "Readout-signal amplification by homodyne detection scheme," *Proc. SPIE*, **6620** (2007) 662005.
- 8) H. Mikami, K. Osawa and K. Watanabe: "Optical phase multilevel recording in microhologram," *Technical Digest of Optical Data Storage (ODS)*, 7730-68 (2010).
- 9) T. Ide, H. Mikami, K. Osawa and K. Watanabe: "Analysis of phase multilevel recording in microhologram," *International Symposium on Optical Memory (ISOM)*, Th-L-04 (2010).

(2011年6月1日受理)