5章 ホログラフィックメモリー

室井 哲彦[†](正会員)

キーワード：ホログラム，メモリー

1. まえがき

ホログラムを利用してデータを記録するホログラフィックメモリーは古くから検討されてきた¹⁾。ホログラフィックメモリーでは、データを重畳した信号光と、参照光の干渉縞をホログラムとして記録媒体に記録する。近年、ホログラフィックメモリーの光学系に組み込むレーザや空間光変調素子 (SLM: Spatial Light Modulator)、カメラなどの周辺デバイスの高性能化により記録密度やデータ転送速度の向上が期待できることから、Blu-rayなどの光ディスクに代わる次世代の光記録として研究開発が進められている。記録媒体においても、アーカイブ利用を目的としたフォトポリマー材料は、記録、再生特性や長期安定性が向上している²⁾³⁾。これまで、ホログラムを記録、再生する方式として、信号光と参照光の光軸が異なる二光束干渉法、信号光と参照光が同軸のコアキシャル法⁴⁾、ドット状のホログラムを形成するマイクロホログラム⁵⁾等が検討されてきた。本稿では、高密度記録が報告されている二光束干渉法の原理を解説し、この方式を用いて開発されたプロトタイプドライブの概要について述べる。また、更なる高密度記録、高データ転送速度のための要素技術の研究開発が行われており、その動向について報告する。

2. ホログラフィックメモリーの原理

2.1 データの記録と再生

図1にホログラフィックメモリーの記録と再生の原理を示す。ホログラフィックメモリーでは、デジタルデータを2次元に配列し、多数のデジタルデータを一括して記録、再生する。この2次元配列のデータはページデータと呼ばれる。図1(a)に示すように、信号光は液晶パネルなどのSLMに表示されたページデータにしたがって変調される。ページデータが重畳した信号光と参照光の干渉縞としてデータは記録媒体に記録される。一方、データを再生

図1 ホログラフィックメモリーの記録と再生の原理

するときは、図1(b)に示すように、記録時と同じ条件の参照光のみを記録媒体に照射する。参照光はホログラムで回折し、データが重畳した再生光が得られる。これをカメラで検出することにより、データを再生することができる。

2.2 多重記録方式

ホログラフィックメモリーでは、記録媒体の同じ位置に異なるデータを多重記録することができるため、高密度記録、すなわち大容量記録が可能である。多重記録は信号光や参照光の記録媒体への入射条件を変えることで実現でき、角度多重記録¹⁾⁶⁾、シフト多重記録⁷⁾、波長多重記録⁸⁾、位相コード多重記録⁹⁾、ペリストロフィック多重記録¹⁰⁾などの記録方式が報告されている。また、角度多重記録とペリ

[†] NHK 放送技術研究所
"Holographic Memory" by Tetsuhiko Muroi (NHK Science and Technology Research Laboratories, Tokyo)

図2 角度多重記録の原理

ストロフィック多重記録を組合せる方法¹¹⁾や、さらにこの組合せにシフト多重記録を組合せる方法¹²⁾など、複数の多重方式を組合せて記録密度を向上することも可能である。ここでは、二光束干渉法のうちの角度多重記録、シフト多重記録、ペリストロフィック多重記録について解説する。

角度多重記録は信号光や参照光の記録媒体への入射角度を変えることにより多重記録する方式である。図2に角度多重記録の原理を示す。図2(a)に示すように、信号光と参照光の光軸を固定し、記録するページデータを変えながら記録媒体の角度を変えることで角度多重記録することができる。あるいは、図2(b)に示すように、記録媒体と、記録媒体に対する信号光の入射角度を固定し、ページデータを変えながら参照光の角度のみを変えることも多重記録することができる。

シフト多重記録は記録媒体を移動することにより多重記録する方式である。図3にシフト多重記録の原理を示す。信号光と参照光の光軸は固定し、ページデータを変えながら記録媒体を移動させることにより、異なるページデータを同じ場所に多重記録することができる。さらに、参照光を球面波にすることにより、移動する距離を小さくすることができ¹³⁾、

図3 シフト多重記録の原理

図4 ペリストロフィック多重記録の原理

高密度にページデータを記録することができる。

ペリストロフィック多重記録は、記録媒体を回転させることにより多重記録する方式である。図4にペリストロフィック多重記録の原理を示す。信号光と参照光の光軸を固定し、ページデータを変えながら記録媒体を回転させることにより、異なるページデータを同じ場所に多重記録することができる。

2.3 記録密度

ホログラフィックメモリーにおいて、データの記録密度 D は、多重記録の多重数を m 、1ページデータ当たりのデータ量を M 、ホログラムの大きさを s とすると、

$$D = mM/s \quad (1)$$

で表される。したがって、記録密度を向上するためには、多重数を増やす、1ページデータ当たりのデータ量を増やす、ホログラムの大きさを小さくすればよいことがわかる。多重数を増やすためには、角度多重記録やペリストロフィック多重記録の場合、角度間隔を狭くすればよい。またシフト多重記録では移動量を小さくすればよい。しかし、

図5 ポリトピックフィルタによる再生光の分離

過度に角度間隔を狭く、あるいは移動量を小さくすると、隣接するページデータ間でのクロストークが発生しやすくなり、再生データの信号対ノイズ比を劣化させる。また、1ページデータ当たりのデータ量は、SLMやカメラの画素数に依存する。画素数が多いデバイスを利用することにより、記録密度は向上する。ホログラムの大きさは対物レンズの焦点距離とレーザーの波長の積の2乗に比例するため、ホログラムを小さくするためには、焦点距離や波長を短くし、信号光の集光スポットに記録媒体を設置すればよい。しかし、集光スポットに記録媒体を設置すると、記録媒体の一点に光が集中することになり、一つのページデータを記録するための記録材料の消費量が局所的に多くなってしまい、そのため、同じ場所に記録できるページデータ数が減り、多重数が減少することが考えられる。そこで、ホログラムの大きさ自体は大きくなるものの、集光スポットからずらした位置に記録媒体を設置し、隣接するホログラムが重なるように記録した状態においても、再生するときに隣接するホログラムからの再生光を遮断できる方法が提案されている¹⁴⁾。図5にポリトピックフィルタ（矩形開口）を用いた再生光の分離の原理図を示す。レンズの集光位置にポリトピックフィルタが設けられており、所望のホログラムからの再生光は開口を通過しカメラに到達するが、隣接するホログラムからの再生光はフィルタで遮断される。このとき、データの記録密度 D は、フィルタの開口面積を S とすると、

$$D = mM/S \quad (2)$$

で表される。

近年、データの記録密度として、角度多重記録のみを用いて440多重することで2.4 Tbit/inch²¹⁵⁾、角度多重記録とペリストロフィック多重記録を組合せて800多重記録することで1 Tbit/inch²¹¹⁾、シフト多重記録、ペリストロフィック多重記録、角度多重記録を組合せて2 Tbit/inch²¹²⁾が報告されている。

2.4 データ転送速度

ホログラフィックメモリーのデータ転送速度 V は、1ページデータ当たりの情報量 M と、単位時間当たりに記録、再生できるページデータ数 T の積、

$$V = MT \quad (3)$$

で表される。データを記録するときは、ページデータを記録するSLMの画素数が多く、フレームレートが高いほど高速にデータを記録することができる。一方で、フレームレートが高くなると露光時間が短くなるため、レーザーの高出力化や記録媒体の高感度化が求められる。データを再生するときは、再生されたページデータを検出するカメラのフレームレートが高いほど高速にデータを再生することができる。また、サンプリング定理より、カメラの画素間隔はSLMの画素間隔より小さく、画素数は多いことが求められる。さらに、記録時と同様に、フレームレートが高くなると露光時間が短くなるため、レーザーの高出力化や記録媒体の高屈折率化によるホログラムの回折効率の向上が必要である。

3. ホログラフィックメモリー記録再生装置

3.1 光学系

近年、ホログラフィックメモリーによる高精細映像の記録と再生が行われている^{16) 17)}。光学系の構成は二光束干渉法を利用し、信号光と再生光が同じ光路を逆方向に進む位相共役型の光学系である。図6に二光束干渉法によるホログラフィックメモリーの位相共役型光学系を示す。レーザーのビーム径は拡大され、PBS1で信号光と参照光に分離される。PBS1を透過したp偏光の信号光はPBS2も透過し、ページデータが表示されたSLMで変調される。SLMでs偏光に変調された成分がPBS2で反射され、対物レンズで集光されて記録媒体に到達する。一方、PBS1で反射した参照光はガルバノミラーで記録媒体への入射角度が制御される。データが重畳した信号光と参照光の干渉縞としてデータを記録媒体に記録することができる。データを再生するときは参照光のみを照射する。参照光は記録媒体を透過し、ミラーで反射され、再度記録媒体の反対側から入射される。この間で参照光の偏光はs偏光からp偏光にする。ホログラムで回折した再生光は対物レンズを信号光と逆方向に進むため、対物レンズの収差を相殺することができる。さらに再生光は矩形開口のポリトピックフィルタ、PBS2を透過してカメラで撮像され、カメラ画像からページデータが得られる。

3.2 信号処理の構成

ホログラフィックメモリーにおけるデータの記録と再生において、データは符号化変調される。以下にデータ記録時の信号処理の流れを述べる。はじめにデータを符号化変調し、バースト誤りを拡散させるためのインタリーブを適用する。これを2次元に配列してページデータを作成する。

(a) データ記録時

(b) データ再生時

図6 二光束干渉法によるホログラフィックメモリの位相共役型光学系

ページデータには、再生時にデータ領域を検出するために、データ領域内外にマークが付加される。作成されたページデータは光学系内のSLMに順次送られ、データが記録される。データ再生時にカメラで撮像された再生像は、はじめにマークを基準にデータ領域が特定され、データが検出される。その後、デインターリーブ、復号することで、元のデータを再生することができる。

符号化変調方式としては、Blu-rayなどの光ディスクと同様に、畳み込み符号で符号化し、RLL変調で変調する方式¹⁸⁾や、空間結合LDPCで符号化し、5ビットを3×3画素の2次元配列に変調する5:9変調¹⁹⁾が利用されている。

3.3 プロトタイプドライブによる高精細映像の記録と再生

2016年にホログラフィックメモリのプロトタイプドライブが製作された^{15) 17) 18)}。図7にプロトタイプドライブと

(a) ホログラフィックメモリープロトタイプドライブ

(b) 8Kスーパーハイビジョン映像の再生の様子

図7 ホログラフィックメモリープロトタイプドライブによる高精細映像の記録と再生

8Kスーパーハイビジョン映像の再生の様子を示す。プロトタイプドライブは、データの記録密度は2.4 TBit/inch²であり、直径13cmのディスク当り2TB相当のデータを記録することができる。また、光学系のデータ転送速度は520 Mbpsである。符号化変調方式は、畳み込み符号で符号化し、RLL変調で変調しており、符号化変調率は2/3である。復号はRLLターボ復号を用いている。このプロトタイプドライブを用いて、85 Mbpsに圧縮された8Kスーパーハイビジョン映像の記録と再生が行われた。

4. 更なる記録密度、データ転送速度向上技術

ホログラフィックメモリの更なる大容量化、高データ転送速度化に向けた基礎的な研究も継続して行われている。

レーザ光のp偏光とs偏光を用いて、それぞれの偏光で異なる二つのページデータを同時に記録、再生する方式が提案されている²⁰⁾。これによりデータ転送速度は記録、再生ともに最大で2倍にすることができる。しかしながら、光の偏光状態を記録できる記録媒体が必要になる。また、長期安定性のフォトポリマー媒体を用いた場合において、データ再生時にp偏光とs偏光の参照光を同時に記録媒体に照射し、異なる二つのページデータを同時に再生する方

式が提案されている²¹⁾。本方式では再生時のデータ転送速度を最大で2倍にすることができる。

また、1ページデータ当たりのデータ量を増やすために、従来の2値のシンボルではなく、多値のシンボルによる記録、再生が検討されている。データ記録時のページデータ表示用に位相変調SLMを用い、各シンボルで異なる位相情報が重畳した信号光と、平面波の参照光の干渉縞としてデータを記録する。データを再生する際には、ホログラムからの再生光にプローブ光を用いてホモダイン検出することで再生できる²²⁾。また、振幅変調と位相変調の双方を用いた空間直交振幅変調が検討されている。ページデータは、6画素から構成される単位データ領域を複数配列することで構成され、単位データ領域は2画素をパイロット信号、4画素をデータ領域に割当てる。異なる二つのページデータを同じ場所に二重露光することで、空間直交振幅変調信号としてデータを記録する。このとき二つのページデータのパイロット信号の位相状態を変えることで、再生データを高精度で検出できるとしている²³⁾。

5. むすび

ホログラフィックメモリーの記録、再生の原理と記録再生装置の概要および更なる大容量化、高データ転送速度化に資する技術動向について述べた。プロトタイプドライブが開発され、高精細映像の記録、再生ができるようになり、実用化に向けた進展が見られた。また、記録密度およびデータ転送速度の向上に向けた要素技術も合わせて継続して研究されており、今後のホログラフィックメモリーの更なる発展が期待される。

(2017年10月2日受付)

〔文 献〕

- 1) E.N. Leith, A. Kozoma, J. Upatnieks, J. Marks and N. Massey: "Holographic data storage in three-dimensional media", Appl. Opt., **5**, pp.1303-1311 (1966)
- 2) T. Ando, T. Shimizu and K. Masaki: "Multiplexing Characteristics of Aromatic Photopolymer for Holographic Data Storage Media", IWH 2011 Digest, pp.53-54 (2011)
- 3) 田中: "ホログラムメモリー用記録媒体の開発", ボリュームホログラフィックメモリー技術研究会講演予稿集, pp.1-5 (2012)
- 4) H. Horimai and X. Tan: "Collinear Technology for a Holographic Versatile Disk", Appl. Opt., **46**, 5, pp.910-914 (2006)
- 5) H. Mikami and K. Watanabe: "Microholographic Optical Data Storage with Spatial Mode Multiplexing", Jpn.J. Appl. Phys., **52**, 9, pp.09LD02.1-09LD02.7 (2013)
- 6) F.H. Mok: "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate", Opt. Lett., **18**, pp.915-917 (1993)
- 7) G. Barbastathis, M. Levene and D. Psaltis: "Shift multiplexing with spherical reference waves", App. Opt., **35**, pp.2403-2417 (1996)
- 8) G.A. Rakuljic, V. Layva and A. Yariv: "Optical data storage by using orthogonal wavelength-multiplexed volume holograms", Opt. Lett., **17**, pp.1471-1473 (1992)
- 9) M. Ezura, S. Baba and N. Kihara: "Holographic Memories Using 2-Dimensional Phase-Code Multiplexing Method", Jpn.J. Appl. Phys., **43**, pp.4954-4958 (2004)
- 10) K. Curtis, A. Pu and D. Psaltis: "Method for holographic storage using peristrophic multiplexing", Opt. Lett., **19**, pp.993-994 (1994)
- 11) T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita and N. Ishii: "High Density Data Recording Using Angle and Peristrophic Multiplexing in Holographic Memory", EOSAM 2016, TOM3 S03 (2016)
- 12) <http://www.tus.ac.jp/today/20151105000.pdf> (2017.9.26現在)
- 13) S. Yoshida, H. Kurata, S. Ozawa, K. Okubo, S. Horiuchi, Z. Ushiyama, M. Yamamoto, S. Koga and A. Tanaka: "High-Density Holographic Data Storage Using Three-Dimensional Shift Multiplexing with Spherical Reference Wave", Jpn.J. Appl. Phys., **52**, pp.09LD07.1-09LD07.5 (2013)
- 14) K. Anderson and K. Curtis: "Polytopic Multiplexing", Opt. Lett., **29**, 2, pp.1402-1404 (2004)
- 15) T. Hoshizawa, K. Shimada, K. Fujita and Y. Tada: "Practical angular-multiplexing holographic data storage system with 2 terabyte capacity and 1 gigabit transfer rate", Jpn.J. Appl. Phys. **55**, 09SA06 (2016)
- 16) N. Kinoshita, Y. Katano, T. Muroi and N. Saito: "Demonstration of 8K SHV Playback from Holographic Data Storage", ISOM Digest 2015, Mo-B-02 (2015)
- 17) http://www.nhk.or.jp/pr/marukaji/pdf_ver/411.pdf (2017.9.26現在)
- 18) Y. Nakamura, T. Hoshizawa: "Two high-density recording methods with run-length limited turbo code for holographic data storage system", Jpn.J. Appl. Phys., **55**, pp.09SA01 (2016)
- 19) N. Ishii, Y. Katano, T. Muroi and N. Kinoshita: "Spatially coupled low-density parity-check error correction for holographic data storage", Jpn.J. Appl. Phys. **56**, 09NA03 (2017)
- 20) T. Ochiai, D. Barada, T. Fukuda, Y. Hayasaki, K. Kuroda and T. Yatagai: "Angular multiplex recording of data pages by dual-channel polarization holography", Opt. Lett., **38**, pp.748-750 (2013)
- 21) T. Muroi, Y. Katano, N. Kinoshita and N. Ishii: "Dual-page reproduction to increase the data transfer rate in holographic memory", Opt. Lett. **42**, pp.2287-2290 (2017)
- 22) A.C. Urness, W.L. Wilson and M.R. Ayres: "Homodyne detection of holographic memory systems", Proc. SPIE, **9201**, pp.92010Y (2014)
- 23) S. Honma and M. Takahashi: "Duplex Phase Code based on Two-Step Exposure Technique for Holographic Data Storage", ISOM Digest 2016, Tu-J-07 (2016)

室井 哲彦 2002年、電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了。同年、NHK放送技術研究所 Post Doctoral Fellow。2004年、NHK入局。放送技術研究所に勤務。冷陰極ディスプレイ、ホログラフィックメモリーの研究に従事。博士(工学)。正会員。