

多層化コリニアホログラムによる超高密度記録

岡本 淳・渋川 敦史

Multilayer Collinear Holographic Memory for Ultra-High Density Recording

Atsushi OKAMOTO and Atsushi SHIBUKAWA

This study proposes multilayer collinear holographic memory (MCHM), a system that is capable of multilayer recording without physical laminar structure in an optical recording medium. Firstly, we showed that MCHM has the great potential for making beyond 100 multiplexed hologram layers within the medium of 600 μm in thickness due to extremely sharp shift selectivity along the thickness direction with nearly 5 μm . Next, we clarified the effectiveness of a movable random phase mask on eliminating inter-layer crosstalk. Finally, we examined memory capacity considering a three dimensional page arrangement which has a definite influence on playback image qualities.

Key words: holographic memory, multilayer, shift selectivity, signal-to-noise ratio (SNR)

ホログラフィックメモリの記録密度は、すでに片面BDの記録密度(25 GB/disk)の数10倍以上に達しており、回折限界によって制限された面記録密度をはるかに凌いでいる¹⁾。しかし、これまでに提案されてきた多重方式は記録媒質の厚さ方向へは単一のホログラフィック記録を行うもので、厚さ400~800 μm のフォトリソ媒質における三次元の理論記録密度限界が1 PB/disk程度²⁾であることを考えると、媒質の潜在的記録空間を効率よく活用できているとはいいがたい。記録媒質や周辺技術の改良だけでなく、記録方式そのものを根本的に見直すことで、今後、大幅な記録密度向上の余地があると考えられる。

このような観点から、われわれは多層化コリニアホログラフィックメモリ(MCHM: multilayer collinear holographic memory)を提案し、研究を進めている³⁾。MCHMは、同一光軸の参照光と信号光を用いるコリニアホログラフィックメモリ(CHM: collinear holographic memory)⁴⁾に新たに純光学的な多層化技術を導入することによって、記録密度向上を目指す。本報告では、MCHMにおける媒質厚さ方向へのシフト選択性および記録可能な限界データページ数について、高速フーリエ変換ビーム伝搬法(FFT-BPM)を用いて解析した結果を中心に紹介する。

1. MCHMの構成と動作原理

図1に透過型MCHMの概略図を示す。記録媒質部の拡大図に示すように、本手法はコリニアシフト多重記録によって形成された多重化ホログラム層を z 軸方向へ多層化することで、媒質がもつ屈折率変調量の高効率な活用を狙ったものである。MCHMにおいては、現行の多層BDのように記録媒質に物理的な多層構造を用意することなく、焦点深度多重または媒質シフト多重により純光学的なホログラムの多層記録を実現できる。また、本方式はCHMを基礎としているため、従来の光ディスク技術との高い互換性やコンパクトなホログラム光学系の利点も併せて有している。さらに、二値位相0, π を有する可動ランダム位相マスク(MRPM: movable random phase mask)を空間光変調器(SLM)の直後に配置する。MRPMは、記録フーリエ面における直流成分除去と層間クロストーク低減の両方に効果を発揮する。ここで、SLMと対物レンズ1, 2, 画像センサーは4f光学系を構成している。

記録過程において、まずディスク面内方向(x - y 軸方向)に沿ったコリニアシフト多重記録を行う。このようにして1つの記録層を形成した後、 z 軸方向に媒質シフトを行い、再度 x - y 軸方向への多重記録を行うことで、ホログラムが多層化される。一方、再生過程では、記録過程と同様

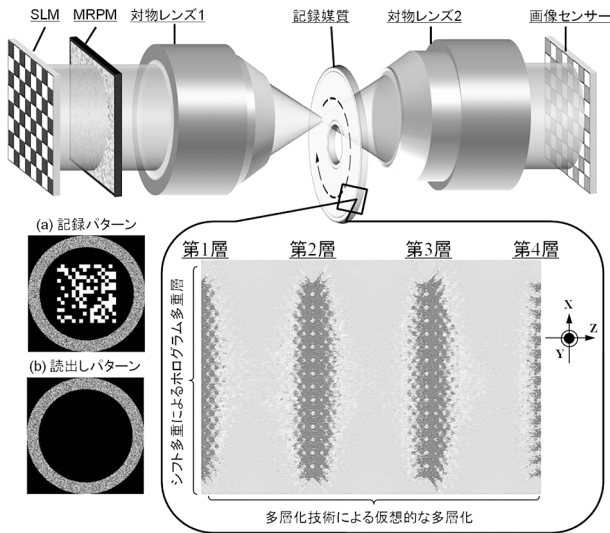


図1 多層化コリニアホログラフィックメモリー。

表1 解析に用いたパラメーター。

波長 λ (nm)	408
対物レンズ開口数 NA	0.54
媒質屈折率 n_0	1.5
媒質ダイナミックレンジ M#	18.47
最大屈折率変調量 n_{\max}	4.0×10^{-3}
解析領域 $W_x \times W_y \times L$ (μm^3)	$162.8 \times 162.8 \times 600$
格子点数 $N_x \times N_y \times N_z$	$512 \times 512 \times 400$
刻み幅 $d_x \times d_y \times d_z$ (μm^3)	$0.318 \times 0.318 \times 1.50$
ピクセル数 (SLM) $N_{x\text{SLM}} \times N_{y\text{SLM}}$	256×256
ピクセルピッチ $d_{x\text{SLM}} \times d_{y\text{SLM}}$ (μm^2)	10×10

に、媒質の回転およびシフトによって所望のデータページを選択的に再生することができる。

2. MCHM の特性と性能評価

以下では、MCHM の諸特性および性能を数値解析によって評価する。解析に使用したパラメーターを表1に示す。また、記録媒質内の光波伝搬計算は、FFT-BPMを用いた⁵⁾。

2.1 z 軸方向のシフト選択性

光学的手法によってホログラムの多層記録を実現するためには、z 軸方向シフト選択性を利用する必要がある。図2に、4つの異なる対物レンズ開口数 (NA) を用いた場合における、z 軸方向シフト選択性を示す。NA の増大とともに、シフト選択性が大幅に向上している。NA が 0.60 の場合、z 軸方向シフト選択性は約 $5 \mu\text{m}$ であった。これは、媒質位置を z 軸方向へ約 $5 \mu\text{m}$ 変位させることで、次の層のホログラムが書き込めることを意味している。したがって、記録媒質が十分に大きなダイナミックレンジを有する場合、厚さ $600 \mu\text{m}$ の記録媒質中に約 100 層程度の記

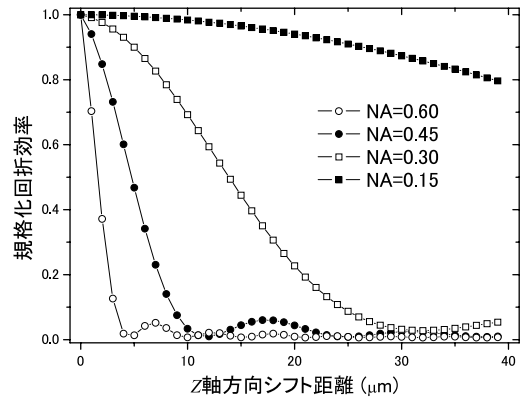


図2 z 軸方向のシフト選択性。

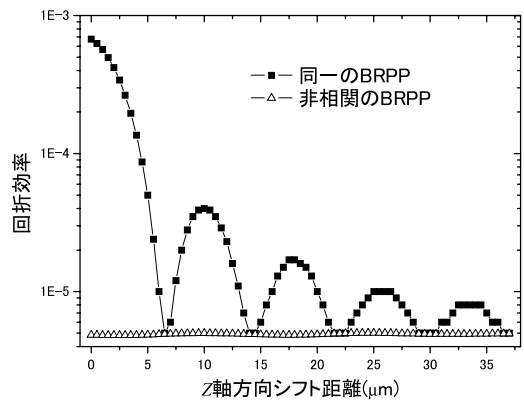


図3 可動ランダム位相マスク (MRPM) による層間クロストークの低減効果。

録層が形成できることになり、MCHM の潜在力の高さがうかがえる。

2.2 層間クロストークの低減効果

ある特定層のページを再生する際に発生する非再生層からの不要な回折光成分は、層間クロストークの主原因であり再生光の SN 比を劣化させるため、メモリーシステムの記録密度が低下する。そこで、MRPM の移動または回転等によって記録層ごとに異なる二値ランダム位相パターン (BRPP: binary random phase pattern) を加えることで、層間クロストークを低減し、SN 比の改善を図る。図3において、記録時と同一の BRPP を用いた場合、媒質のシフト距離に応じて回折効率が周期的に変動している。一方で、記録時とは非相関の BRPP を用いた場合、ホログラムからの回折光がほとんど発生しない。この結果は、MRPM を導入することにより、層間クロストークを十分に低減できることを示している。

2.3 ページ配置と記録密度の関係

図4 (a) のページ配置では、螺旋状に x-y 軸方向に沿った二次元のコリニアシフト多重のみを行う。一方、図4 (b), (c) のページ配置では、従来のシフト多重とともに z 軸

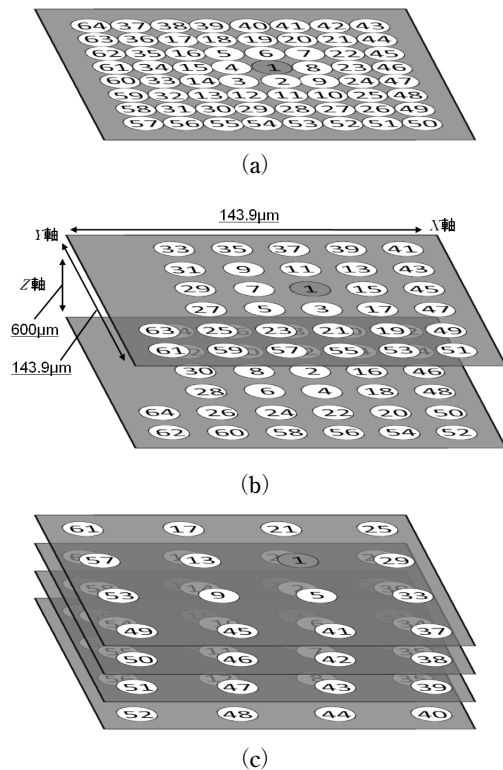


図4 多重記録におけるページ配置. (a) 1層, (b) 2層, (c) 4層.

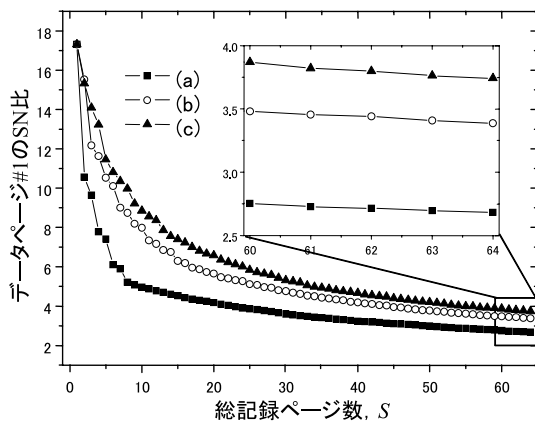


図5 再生信号のSN比におけるページ配置依存性.

方向に沿った多層化技術を併用する. ここで, すべてのページ配置において, $143.9 \times 143.9 \times 600.0$ (μm^3) の体積中に 64 枚のデータページを記録し, 面記録密度はほぼ等しいと仮定する. 図5は, 総記録ページ数 S と再生されたデータページ #1 における SN 比の関係を表している. $S = 64$ の場合における SN 比は, ページ配置 (a)~(c) に対して, それぞれ 2.68, 3.38, 3.74 であった. 多層記録を利用した配置 (b) および (c) は, 単層記録の配置 (a) よりも

表2 ページ配置に関するパラメーター.

ページ配置	x - y 軸方向のシフトピッチ Δx - y (μm)	z 軸方向のシフトピッチ Δz (μm)	記録ページ数 $M_x \times M_y \times M_z$ (64)
1層(a)	1.91	×	$(8 \times 8 \times 1)$
2層(b)	2.54	600	$(6 \times 6 \times 2)^{-8}$
4層(c)	4.45	200	$(4 \times 4 \times 4)$

良好な SN 比を維持できることがわかる.

実際のホログラフィックメモリーにおいて最低限要求される SN 比を 2.0 と仮定し, 表2に示したページ配置 (a)~(c) に関するパラメーターを用いて, 閾値 SN 比までデータページを記録し続けた. その結果, ページ配置 (a)~(c) において, それぞれ 114 枚, 180 枚, 200 枚のページを記録・再生可能であった. 以上より, NA が 0.54 の光学系と $M\#$ (媒質ダイナミックレンジ) が 18.5 程度の現存する記録媒質を用いる場合においても, 従来の CHM と比較して, MCHM は少なくとも 2 倍近い記録密度を達成できることを示した. より高い NA を有する対物レンズや最適化したページ配置等を利用することで, 記録密度は改善の余地がある.

記録媒質の進歩とシステムの改良により, ホログラフィックメモリーによって三次元の回折限界に迫る記録密度が達成される可能性がある. 今後は, 位相共役波を用いて, 媒質中を伝搬する信号光や参照光のゆらぎを補正し, SN 比を大きく改善する方法について検討する.

文 献

- 1) K. Shimada, T. Ishii, T. Ide, S. Hughes, A. Hoskins and K. Curtis: "High density recording using monocular architecture for 500 GB consumer system," *Optical Data Storage Topical Meeting (ODS) '09* (2009) pp. 61-63.
- 2) L. Hesselink, S. S. Orlov and M. C. Bashaw: "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, **92** (2004) 1231-1280.
- 3) A. Shibukawa, A. Okamoto, A. Tomita, M. Takabayashi and K. Sato: "Multilayer collinear holographic memory with movable random phase mask," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 09ME10-5.
- 4) K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto and K. Watanabe: "Improved performance in coaxial holographic data recording," *Opt. Express*, **15** (2007) 16196-16209.
- 5) J. Tanaka, A. Okamoto and M. Kitano: "Development of image-based simulation for holographic data storage system by fast Fourier transform beam-propagation method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 03A0281-03A0285.

(2011年6月10日受理)