

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360034

研究課題名(和文) 共焦点3次元スペックル多重記録によるテラバイト超反射型ホログラフィックメモリ

研究課題名(英文) Reflection-type Holographic Memory with Storage Capacity of More Than One TeraByte by Confocal Three-dimensional Speckle Multiplexing

研究代表者

的場 修 (OSAMU MATOBA)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授

研究者番号：20282593

研究成果の概要(和文)：

1 テラバイト超の記録容量をもつ次世代光ディスクを開発するために、スペックル多重記録反射型ホログラフィックメモリに共焦点系を導入し、シミュレーションにより記録容量を従来比 3.36 倍の 4.35 テラバイトに増加させることに成功した。データ符号化においてページあたりの情報量を増やすマルチ解像度符号化を提案し、従来比 1.5 倍となることを見積もった。以上の成果から 1 テラバイト超の記録容量実現の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：

For the development of next generation optical disk memory, we succeeded to achieve storage capacity of 4.35TB by using a confocal scheme that is 3.36 times larger than that without the confocal scheme in a reflection-type holographic memory with three-dimensional speckle shift multiplexing. In page data coding, we increased the amount of data in one page by 1.5 times larger by proposing multi-resolution data coding. These results indicated that it is possible to achieve storage capacity of 1TB by combining these methods.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：応用光学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：ホログラフィックメモリ、共焦点系、ポリマー、材料収縮、3次元多重記録、データ符号化、マルチ解像度

1. 研究開始当初の背景

近年のデジタル放送や通信技術の発展により、個人の扱う情報量は増えている。磁気ハードディスクの記憶容量が 1 テラバイト (TB) クラスになり、半導体メモリはデータの高速度転送で優位性を示している。その中で光ディスクメモリは、Blu-Ray ディスクにより 2 層型で 50 ギガバイト (GB) の記憶容量に留まっている。光ディスクのもつ可搬性に加えて、磁気ハードディスクに蓄えられた大量

データのバックアップ記録メディアとして利用するためには、光ディスクメモリの記憶容量の増大化が望まれている。

現状と同じ 5 インチディスクに 1TB の記憶容量と 1 ギガビット毎秒のデータ転送速度を実現するものとしてホログラフィック光メモリが期待されている。研究代表者らは、反射型ホログラムの奥行き方向の相互作用長の短さに着目して、反射型ホログラムを 3 次元的に多重記録することにより、記録容量

の増大化を図る反射型ホログラフィックメモリの提案を行い、神戸大学特許として既に認定されている。この反射型ホログラフィックメモリでは、参照光にランダム位相マスクを配置することでスペックルパターンを発生し、3次元多重記録を行う。これまでの研究成果としては、3次元多重記録における記録容量が集光レンズの開口数(NA)の4乗に比例することを明らかにし、5インチサイズで最大2.37TB(NA=0.85, 波長 $\lambda=405\text{nm}$)の容量となる。この値は理想値であるため、1TB超の記録容量を実現するには、5倍以上の記録容量を実現する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、更なる記録容量の増大化を目指して、共焦点3次元スペックルシフト多重記録による反射型ホログラフィックメモリを提案する。1TBを超える光ディスクメモリの実現に向けて従来技術を凌駕する記録方法、記録材料に要求するスペックを明らかにする。また、記録容量向上に向けてはデータ符号化が重要である。このデータ符号化により、光信号の0と1の再生誤りを防ぐ事ができる。しかしながらデータ符号化により1ページあたりの情報量が従来手法では約半分に低下する。このため、ページあたりの情報量を増加させるためのマルチ解像度符号化法を検討した。

主な研究課題は以下の3点である。

1. 共焦点3次元スペックルシフト多重記録によるページ間クロストーク低減効果の確認
2. 記録材料モデルの構築
3. データ符号化法の改良によるページ効率の向上

3. 研究の方法

提案する3次元スペックルシフト多重記録による反射型ホログラフィックメモリの概念図を Fig.1 に示す。入力画像と参照光はディスクに対して対向方向から入射し、反射型ホログラムを形成する。この反射型ホログラムを3次元多重記録し、その再生像を評価する。本研究では、共焦点効果を調べるために新しくシミュレータを改良した。また、記録

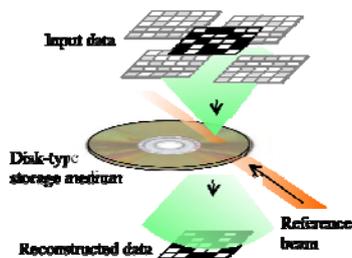


Fig. 1 3次元スペックルシフト多重記録による反射型ホログラフィックメモリ。

材料モデルとして、局所的に変動する光強度分布に対応可能なモデルとした。さらにページあたりの情報量を増やすマルチ解像度符号化を検討した。

(1) シミュレータの開発

共焦点光学系を新しくホログラフィックメモリシミュレータに導入した。シミュレータの概要を Fig. 2 に示す。記録時及び再生時にフーリエ変換系において、ナイキスト径と同じアパーチャを配置している。2つのアパーチャは共役な結像関係にある。これにより、3次元シフト多重記録によるノイズとなる再生成分を除去することが期待できる。シミュレータでは、レンズによる光学的フーリエ変換、フィルタ処理、角スペクトル伝播計算を用いる。ホログラム記録材料からの読み出しではスカラー回折理論を用いる。

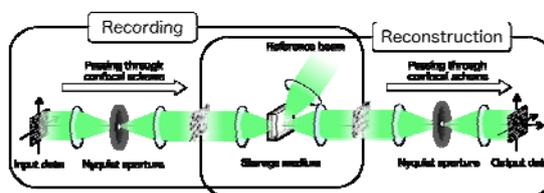


Fig. 2 共焦点3次元スペックルシフト多重記録のシミュレータモデル。

(2) フォトポリマー材料モデルの構築

ホログラフィックメモリにおいて1回書き込みの材料としてフォトポリマーは有力である。これは、高ダイナミックレンジ、高感度、長寿命であるという特徴によるものである。これまでにフォトポリマーでのホログラム記録及び再生過程をシミュレートするモデルが提案されているが、大きく分けて、光学特性を扱うマクロなモデルと分子レベルの反応を扱うマイクロモデルの2つがある。ホログラムの多重記録解析には計算時間の観点からマクロモデルが有効であり、本研究では Fig. 3 に示すように、局所的な露光分布に従って収縮するマクロ収縮モデルを提案する。記録材料は体積効果を実現するために層状に分割される (Fig.3 では列に分割している) 露光量に応じて、次式のように厚さを変化させる。

$$\delta t_s(m) = (1-s)I(m)\delta t / I_{max} \quad (1)$$

式(1)で、 $\delta t_s(m)$ は第 m 層の収縮後の厚さ、 s は収縮率、 $I(m)$ は m 層の光強度、 δt は収縮前の各層の厚さ、 I_{max} は厚さ方向の最大強度である。

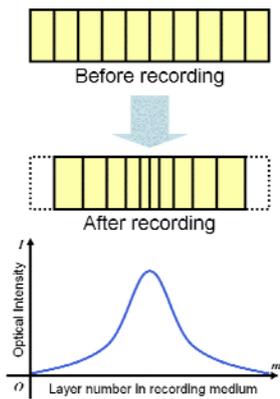


Fig. 3 マクロ局所収縮モデルの概念図.

(3) データ符号化法の改良によるページ効率の向上

ホログラフィックメモリでは、2値画像データを記録し、再生する。再生時には2値化を行うため、再生画像に強度むらが発生すると画像全体でのしきい値処理はビット認識誤りを多く引き起こす。それを防ぐために、1枚の画像をブロックに分割するブロック符号化が用いられる。典型的には、4x4ピクセルに3ピクセルを光らせる3:16符号化がある。この場合にビット誤り率は低下するが、1ページあたりの情報量は半分になる。本研究では、ブロック符号化において、解像度の異なるデータを用いることで1ページあたりの情報量を向上させる。具体的には、Fig. 4に示すように、振幅情報であるブロック符号化に、位相情報として0または π radを加える。ブロック毎に干渉強度を検出することで低解像度となるが異なる2値情報を乗せることができ、1ページの情報量が増す。これをマルチ解像度符号化法と名付けた。

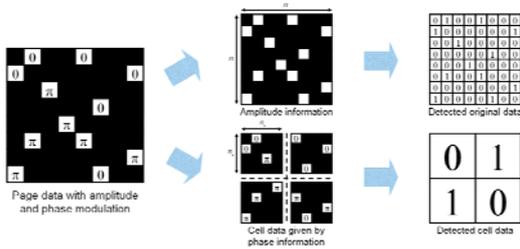


Fig. 4 マルチ解像度符号化法.

4. 研究成果

(1) 共焦点3次元スペックルシフト多重記録によるページ間クロストークノイズ低減効果の確認

多重記録時のページ間クロストークノイズ解析では、記録・再生光学系にクロスト

ークノイズを低減させる共焦点光学システムを導入し、その効果を調べた。シミュレーションに用いた信号ページデータは256x256ピクセル、ページサイズ8.2mmx8.2mm、ピクセルサイズ32 μ m x 32 μ m、各ビットのオーバーサンプリングレートは8である。また、波長532nm、実効NA0.38、記録媒体の厚さ0.5mm、信号光と参照光のなす角135 $^\circ$ とし、アパーチャの径はナイキスト径と同一とした。

単記録における3次元シフト選択性の結果から、面内方向の記録間隔を0.5 μ m、厚さ方向の記録間隔を14 μ mとした。信号光のビーム径が160 μ mであることから面内には最大320多重可能である。奥行きは厚さ0.5mmであるため最大35多重となる。Fig.5(a), (b)にナイキストアパーチャの有無によるビットエラーレートの面内多重記録及び奥行き多重記録の変化を示す。Fig.5(a)より、250多重においてアパーチャの効果により面内でのクロストークノイズによるビット誤り率が1/3に減少することがわかる。Fig.5(b)からアパーチャ導入によりビット誤り率は0になることもわかる。これらの結果から、共焦点光学系を導入することで最大記録容量は5インチディスク1枚あたり1.3TBから4.35TBの3.36倍とすることに成功した。

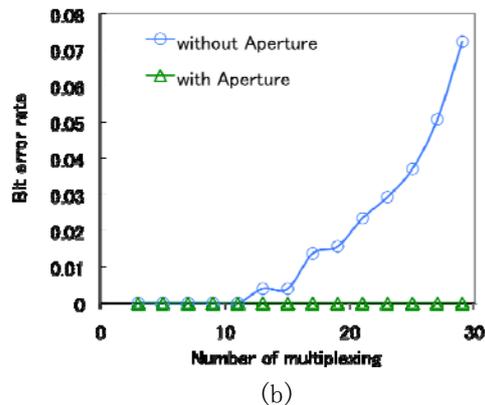
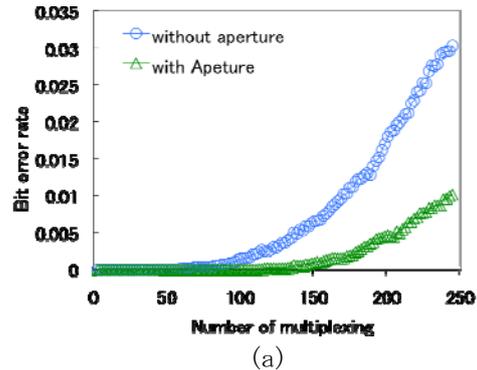


Fig. 5 共焦点光学系の有無によるビット誤り率の変化; (a) 面内シフト, (b) 奥行きシフト.

(2) 記録材料モデルの構築

はじめに式(1)の検証を行った。2つの平面波同士の干渉による Kogelnik の結合波理論とマクロ記録材料収縮モデルを導入したホログラフィックシミュレータからの結果を比較した。Fig. 6 に角度選択性の角度ずれを調べた結果を示す。グラフの横軸は記録媒体の収縮率を表し、縦軸は最適入射角のずれ量を表している。計算結果は赤色の直線であり、○が結合波理論による結果である。両者は良い一致を示していることから一様収縮の場合はモデルは有効であることがわかる。

次に局所収縮モデルの実験的検証を行った。Fig. 7 に示す実験系を組み、レンズを挿入することでフォトポリマー内部で奥行き方向に不均質な強度分布を形成した。フォトポリマーとして厚さ 0.5mm のものを用い、レンズの有無による角度選択性の変化を調べた。その結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a), (b) はそれぞれ実験結果と計算結果である。レンズの有無によるピーク位置のシフト量に大きな差が生じているが、レンズを挿入した場合に、角度選択性の左側が右側に比べてせり上がるという非対称な振る舞いが実験結果と計算結果に見られる。この結果から定量的に一致させるためには局所収縮モデルにおいてホログラムの記録される干渉領域の体積を考慮に入れた収縮量にする等の改良が必要であることが分かった。

次に、局所収縮モデルを用いて、角度多重記録を行い、記録材料の収縮率許容量とその時に実現される記録容量について計算を行った。計算条件を Table 1 に示す。単記録において角度選択性を調べた結果、1st null (第1極小点) が 0.044° であり、3rd null (第

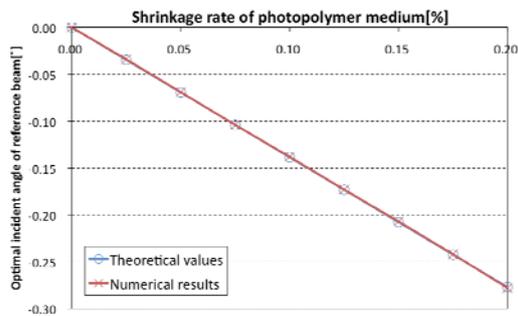


Fig. 6 一様収縮での角度選択性のずれの検証.

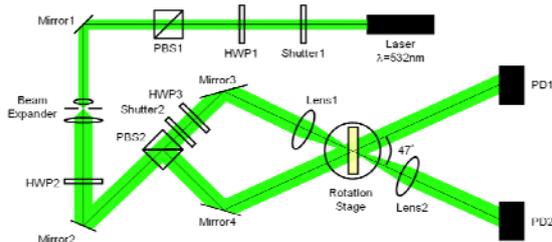


Fig. 7 局所収縮性の検証実験系.

3 極小点) が 0.132° となった。多重記録の解析では 3rd null を採用した。その結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9(a), (b) はそれぞれ、多重記録数に対する信号対雑音比とビット誤り率である。記録媒体の収縮率が大きくなるにつれて、信号対雑音比は小さくなるのがわかる。つまり、材料収縮により再生されたページデータの品質が劣化していると言える。ビット誤り率は収縮率 0.2% では発生していない。251 多重における記録容量を算出すると 164GB となった。収縮率に対して、信号対雑音比とビット誤り率を導出したことに本研究成果は重要な意味がある。今後の課題として、1TB の記録時に許容される収縮率を導出する必要がある。

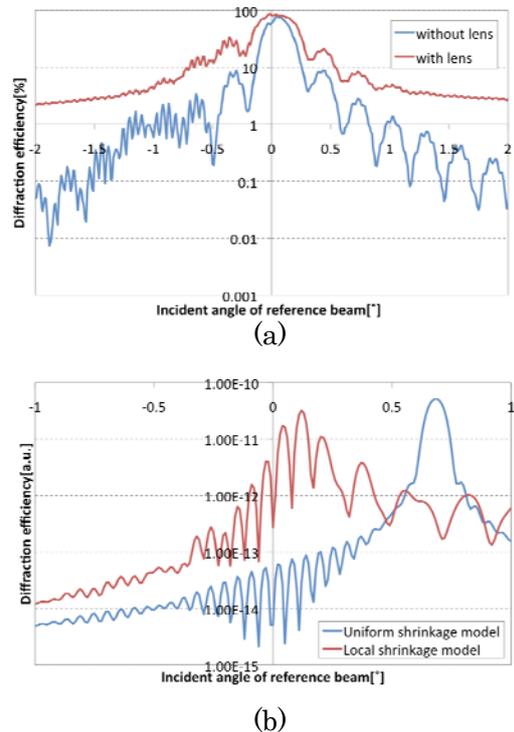


Fig. 8 局所収縮性の検証実験;
(a) 実験結果、(b) 計算結果.

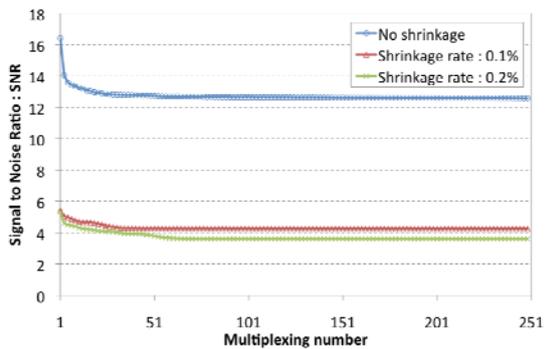
Table 1 計算条件.

Optical system	
Calculation area	7.00416×7.00416mm
Wavelength of light source	405nm
Focal length of lens	10mm
Numerical aperture of lens	0.18
Incident angle of reference beam	1.98°
Input area of page data	2.60208×2.60208mm
Number of input bit	128×128bit
Coding method of page data	1:4 coding
Recording interval of angular multiplexing	0.132° (3rd null)
Recording medium	
Thickness of recording medium	600μm
Average refractive index of recording medium	1.5
Division number of recording medium	500

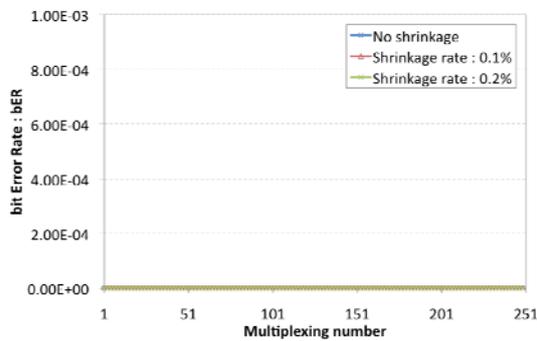
(3) データ符号化法の改良によるページ効率の向上

ブロック符号化として良く用いられている1:4、2:4、3:9、3:16符号化について、位相情報を付加することにより1ページあたりの情報量がどの程度向上するかを計算した。ブロック符号化を用いない場合のページデータの情報量を1とする。このとき、位相情報を付加することにより、符号化による情報量は、0.5、0.75、0.778、0.625となった。その結果、3:9符号化が最も情報量を多くすることができ、1:4符号化に比べて1.5倍にできることを明らかにした。

以上の研究成果から、共焦点光学系及びマ



(a)



(b)

Fig. 9 収縮モデルを用いた時の多重記録特性の計算結果; (a) 信号対雑音比, (b) ビット誤り率.

ルチ解像度符号化を導入することで1TB超の記録容量の実現が期待できることが分かった。また、記録材料として有力なフォトポリマーの収縮モデルを用いることで、記録時に収縮が起こった場合の許容収縮量を算出することが可能になる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

1. O. Matoba, Y. Yonetani, and K. Nitta, "Improvement of Storage Capacity by Confocal Scheme in Reflection-type Holographic Memory System with Speckle Shift Multiplexing," Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, accepted.

2. R. Hiramatsu, M. Shigaki, K. Nitta, O. Matoba, "Multi-resolution Coding using Amplitude and Phase Modulation for Holographic Data Storage," Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, accepted.

3. Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical evaluation of angular multiplexing in reflection-type holographic data storage in photopolymer with shrinkage," Applied Optics, Vol. 49, No.4, pp.694-700 (2010) 査読有.

4. M. Miura, K. Nitta, and O. Matoba, "Numerical estimation of storage capacity in reflection-type holographic disk memory with three-dimensional speckle-shift multiplexing," Journal of Optical Society of America A Vol. 26, Iss. 10, pp. 2269-2274 (2009) 査読有.

[学会発表] (計17件)

1. R. Hiramatsu, K. Nitta, and O. Matoba, "Effect of confocal scheme in macroscopic shrinkage model of photopolymer in speckle-shift-multiplexed reflection-type holographic memory system," International Workshop on Holographic Memories & Display 2010 (IWHM&D 2010), 16D-4 (Nov. 16, 2010, Tokyo, Japan)

2. M. Shigaki, K. Nitta, O. Matoba, "New coding method by multi-resolution for high density recording in holographic data storage," International Symposium on Optical Memory 2010, Tu-H-17 (Oct. 26, 2010, Hualien, Taiwan).

3. M. Shigaki, K. Nitta, O. Matoba, "Validation of macroscopic shrinkage model of photopolymer for holographic memory simulator using angular multiplexing," International Symposium on Optical Memory 2010, Tu-I-15 (Oct. 26, 2010, Hualien, Taiwan)

4. R. Hiramatsu, Y. Yonetani, K. Nitta, O. Matoba, "Evaluation of storage capacity by confocal reflection-type holographic memory system with speckle shift multiplexing," International Symposium on Optical Memory 2010, Tu-I-15 (Oct. 28, 2010, Hualien, Taiwan)

5. M. Shigaki, Y. Yonetani, K. Nitta, and O.

Matoba, "Quantitative evaluation of affect of shrinkage rate on cross-talk noise in reflection-type holographic memory," International symposium on optical memory 2009 (ISOM'09), Tu-G17 (Oct. 6, 2009, Nagasaki, Japan)

6. Y. Yonetani, K. Nitta, and O. Matoba, "Assessment of cross-talk noise in confocal scheme in reflection type holographic memory with speckle shift multiplexing," International symposium on optical memory 2009 (ISOM'09), Tu-G20 (Oct. 6, 2009, Nagasaki, Japan)

[図書] (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://brian.cs.kobe-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

的場 修 (OSAMU MATOBA)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・
教授

研究者番号：20282593

(2) 研究分担者

仁田 功一 (KOUICHI NITTA)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・
准教授

研究者番号：20379340

(3) 連携研究者 なし