

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月 23日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360104

研究課題名（和文） バッファリングを有するナノパターンド微粒子3次元光メモリ

研究課題名（英文） Nano patterned particle media for data storage with buffer ring

研究代表者

江上 力 (EGAMI CHIKARA)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：70262798

研究成果の概要（和文）：非感光領域であるバッファリングを有するナノパターンド微粒子三次元光記録メディアを作製し、新規開発した偏光干渉非線形共焦点レーザ顕微鏡をデータピックアップ系に使用して、微粒子ピットデータの記録再生を行った。同顕微技術の開発によりピックアップ光学系のコントラスト伝達関数（CTF）を大幅に向上することに成功し、光記録ピットとしての微粒子サイズを更に低減した光記録メディアの使用も可能であることを確かめた。

研究成果の概要（英文）：A novel data storage media using spatially patterned nanoparticles with buffer ring was fabricated for high dense digital data recording. Polarization interferometric nonlinear-optical confocal microscope was developed for digital data reconstruction. Increasing the contrast transfer function (CTF) of the microscope proposed, the system can use much smaller nanoparticles as storage data pits.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 6,200,000 | 1,860,000 | 8,060,000 |
| 2011年度 | 4,800,000 | 1,440,000 | 6,240,000 |
| 2012年度 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,400,000 | 4,320,000 | 18,720,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：光記録、顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

近年産業界ではネット経由でプログラムを取り込むクラウドコンピュータの利用が盛んで、単位エネルギー・単位面積当たりのサーバ容量拡大が迫られている。現在、この任をまかされているのがハードディスク(HD)で、容量は最大数TB/disk程度と頻繁にデータを取り出すのに有利である。その反面、放熱量が非常に大きく空調まで含めた消費電力が大問題となっている。そのため、グリーンIT化を

目指したクラウドシステムではアクセスの頻度に応じてHDとランダムマルチアクセス光ディスクを使い分けるハイブリッド型のデータサーバの開発が急務となっている。

上記サーバ開発を目指して、現行光ディスクであるBlue-ray Disk(BD)の数十倍以上の容量を持つ次世代のTB光記録システムの研究が盛んである。高密度化に関しては、光源の短波長化によって達成可能な容量もほぼ限界であるとの観点から、①：ディスク体積を3次元的に使う方法（ホログラムメモリや

3次元光メモリ)や②:デジタルデータの多値化を基にした方法などのブレイクスルーが挙げられている。ホログラムメモリは大容量化が最も容易な技術であるが、振動の影響をいかに回避するかなどの課題がある。一方、bit-by-bit型の3次元光メモリについては、将来より小型化・より低価格化が見込まれるフェムト秒レーザー光源の利用を前提に、ディスク体積を使用してピットを3次的に多重化する方法が研究者のほぼ共通の見解となっている。

ところが、高密度化に伴って、記録線密度がBD光ディスク(25GB)で $0.112 \mu\text{m}/\text{bit}$ にも達しているのが現状で、ディスクへのデータ記録再生におけるエラーがあまりに大きく問題となっている。ピットサイズが小さくなればなるほど、記録再生ノイズは増加し、SNRは減少する。それに伴い、信号の時間軸上でのずれ(ジッター)が発生する。これを回避するにも光学的に様々な方法が考えられているが、現行の光システムの延長では回避がほぼ不可能「僅か4倍速記録時:144Mbpsで6%(ジッター値:72Mbps)」とまで言われている。そこで本研究ではこれらシステムとは全く異なる発想のもとに、上記問題点を同時に満足できる可能性のある、バッファリングを有するナノパターンド微粒子を使ったジッターフリー超高密度光メモリシステムを提案する。ただし、それには光ディスク構造から記録再生精密機械システム、信号処理システムの開発に至るまで、全く新たな概念を導入する必要がある。

2. 研究の目的

本課題ではフォトンモード色素をドーピングしたナノサイズ(直径 200nm)の微粒子を準充填構造で規則的に3次元立体配列させたナノ微粒子群にデジタルデータを多値記録し、偏光ベクトル差分検出型の非線形レーザー顕微鏡によって記録・再生するデータストレージシステムを開発する。このシステムを実現するには、レーザー顕微鏡・偏光顕微鏡を構築するための精密機械・光学・電子技術に加えて、ナノサイズの色素ドーピング微粒子を合成・3次元配列するための化学技術も要求され、総合的な見地からの研究が必要である。我々はこれまでに、光学・電子・精密機械・化学の各見地からメモリに関する基礎技術を総合的に培ってきた。今回これまでに得られた基礎技術を基に新たな課題であるジッターフリー化超高密度低エネルギー・ナノパターンド微粒子光メモリの開発を目指した。

3. 研究の方法

マークエッジ方式を利用している Blu-ray Disk 等の光メモリシステムにおいては、これ以上の転送レートでジッターを回避することがほぼ不可能な状況になっている。ナノ微粒子を3次元に密に配列させ、その際微粒子の周りにはバッファリングと呼ばれる数十nm程度の非感光領域を形成する。これによる構造信号が共焦点散乱信号へコンボリュートされるため、低 NA レンズ使用下でも飛躍的な画像コントラストの向上が実現できる。また、3次元配列させたナノ微粒子群に SCIPER 方式に似た参照トラッキング機能を持たせることで、再生時の非線形共焦点反射信号に微粒子の光学形状としてのクロック信号が自動的に付加される。自己生成信号を検出窓とし A-D, D-A 変調・復調を行うため、原理的にデータ to クロックジッターが全く発生しないシステム構築ができる。しかも 100-200nm 程度の微粒子群を合成してメディア自体を3次的に立体構造化したナノパターンドメディアを形成するため、記録感光領域を物理的に制限し、記録容量および空間分解能を飛躍的に向上できる。

また、本研究では新たにデータ再生用のピックアップ系として超高精細3次元偏光干渉レーザー顕微鏡を開発した(図1参照)。同偏光干渉レーザー顕微鏡の利用により対物レンズの低 NA 化も実現でき、ディスク体積を利用した3次元記録の問題点でもあるレンズの作動距離による膜厚制限も極力低減できる。この顕微鏡は基本となる共焦点顕微鏡に加えてマイケルソン干渉系型のベクトリアル偏光干渉系を含む。一方を検出ビーム、他方を干渉ビームとする。検出ビームからの散乱検出光と参照ビームからのミラーによる反射光が検出面で干渉する。検出面に装備した検光子を回転させることで、強度型の干渉系

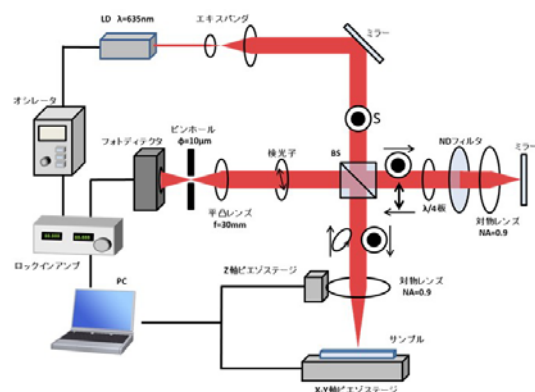


図 1. 記録再生光学系

にも偏光型の干渉系にも変更できる。

実際に微小球を測定する前に、均一媒質と仮定できる微小球の存在しない領域にレーザー光を照射し、均一媒質からの散乱光と参照光との偏光干渉差分ベクトル出力がゼロとなるように検光子の角度を調整し、光学系をセットアップする。これにより通常バックグラウンドノイズとなる、S/N 比の低下を招く等方散乱信号をほぼゼロのオーダーまで落とすことが可能となる。

上記の光学系の準備が整った後に、レーザー光を微粒子部に移動照射する。微粒子に集光照射されたレーザー光によって非線形分極が誘起される。誘起された非線形分極によって、直線偏光で入射した光は楕円偏光となって出射散乱する。あらかじめ微粒子のない領域での散乱光と参照光の干渉信号がゼロとなるように偏光子を調整しているので、微粒子から発生する楕円散乱光と参照光との干渉信号は内部構造に依存した値となる。その結果、球トップからの散乱光ファーフールドパターンはクロス十字形となり、非常に高いコントラストで再生されることとなる。

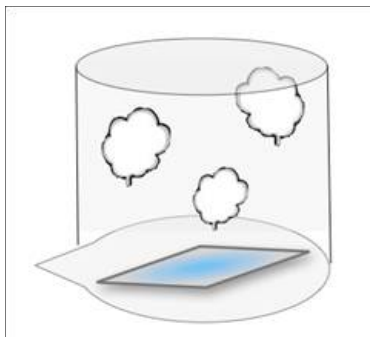


図 2. 蒸気圧法によるサンプル作製

4. 研究成果

(1) ナノ微粒子光記録メディアに関する成果

最初に本研究課題の最初のハードルともなっていたバッファリングを有するナノパターンド微粒子による 3 次元光記録メディアの作製を行った。ナノ微粒子周辺に数 10 nm 程度の非感光領域を設け、ナノ微粒子を規則正しく、3 次元配列させる必要がある。これにより、たとえ低 NA を用いた低い空間分解能で顕微光学系においても非常に高いコントラストでクロック信号およびデータビット信号を再生することが可能となる。メディアの作製はスピコート法、蒸気圧法、ディップ法など様々な手法を検討した結果、蒸気

圧法がもっとも簡便で作製が用意であることを突き止めた。蒸気圧法とは図 2 に示すように、ナノ微粒子溶液を塗布したガラス基板を取り巻く乾燥雰囲気と適度な蒸気圧にコントロールし、加熱により乾燥速度を調整する手法である。溶液乾燥時に微粒子が基板周辺部へ引かれる乾燥速度と表面張力との釣り合い条件を調整することにより適度なバッファ領域を形成しながら微粒子を配列させることができる。40°C 15 時間加熱により作製したナノパターンドメディアの AFM 写真を図 3 に示す。使用した微粒子は直径 200 nm である。写真よりナノ微粒子周辺部に非感光領域であるバッファリングが綺麗に形成されていることが分かる。しかも、微粒子がバッファリングを伴って六法細密充填に近い形で配列されていることが観測できる。

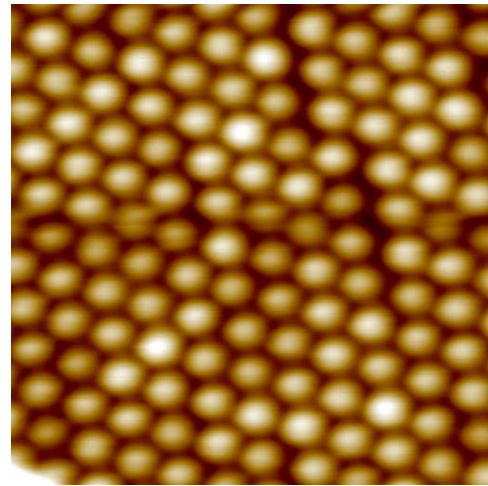


図 3. 微粒子光ディスクの AFM 写真

(2) 記録再生光学系に関する成果

本研究では、直線偏光された CW (Continuous Wave) レーザ光を NA の高い対物レンズによって集光し、試料に照射することで試料内部に $\chi^{(3)}$ を誘起する。これを、共焦点光学系を利用し、対物レンズの焦点における散乱光を高精度に検出した。共焦点光学系により 3 次元の分解能をもつことを可能にしているが、通常の共焦点光学系では回折限界が生じ分解能が焦点深度程度に制限されてしまう。しかし、偏光干渉を共焦点光学系に組み込んだ共焦点偏光干渉系では、3 次の非線形分極による散乱光の情報を検出することで非常に高い分解能を実現し、内部 $\chi^{(3)}$ 分布の測定を可能にしている。しかも、入射光ビームのガウス型強度分布のピーク付近でのみ非線形効果を強く誘起できるため、散乱光波の回折による広がりの影響を極力抑えることができる。加えて、集光ビームのビ

ーク強度をそのまま使用するため、低パワーのCWレーザがあれば十分である。

波長 635 nm(トータルパワー 93.1 μ W)の Laser diode (LD), NA=0.9 の対物レンズを使用したとき、空気中での共焦点光学系の理論的な焦点深度(光軸方向基本分解能)は約 700 nm である。また、焦点面におけるエアリーディスク半径を面内方向分解能と定義すると約 430 nm である。集光光は、ガウス型の強度分布をもっている。この条件下では、焦点付近での光強度は 32.0 kW/cm² となり、非線形分極を発現するのに十分すぎる光強度が得られる。本研究では、このビームスポット付近でのみ発生する 3 次の非線形分極波を検出・影像化して測定を行った。

マイケルソン型偏光干渉共焦点顕微鏡の調整精度を調べるため、同干渉系をあえて強度干渉型にセットして、基本分解能の測定を行った。結果を図 4 に示す。結果から明らかとなり、強度干渉データではあるが、同顕微鏡の基本分解能は 180 nm となり、干渉系を導入していない場合の基本分解能 700 nm と比べても分解能を大きく向上させることができていることが分かる。

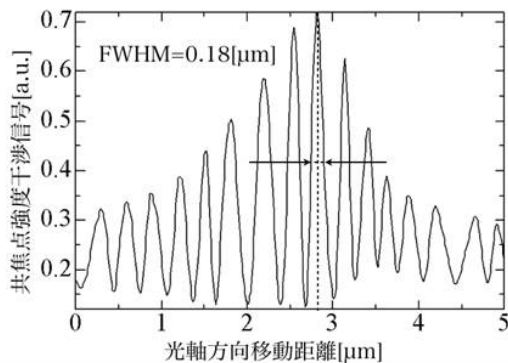


図 4. マイケルソン型強度干渉の
共焦点散乱信号

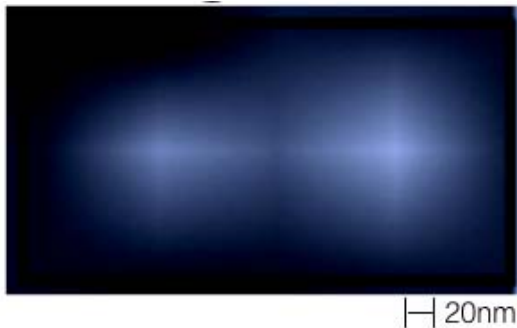
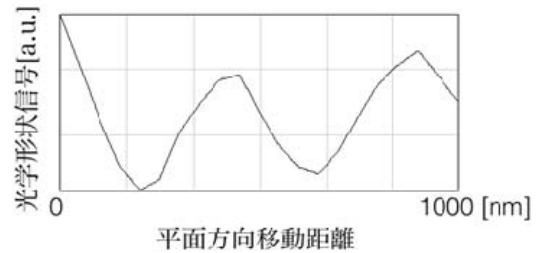


図 5. 微粒子の共焦点偏光干渉画像

続いて、偏光干渉共焦点顕微鏡を偏光干渉型へとセットし、同顕微鏡の分解能推定を行った。偏光干渉系であるため、共焦点反射信号の半値全幅 (FWHM) から数値データとして分解能を測定することができない。そこで同顕微鏡を利用して実際にナノ微粒子の 3 次元計測を行い、光学形状信号から分解能を推定した。測定方法として前ページの左段で説明したとおり、微粒子周辺部の均一媒質にフォーカスを合わせ、同領域からの偏光干渉共焦点信号をゼロとなるように検光子を調整する。その際、干渉信号のフィネスを十分大きくできるように、連続可変 ND を利用して、参照光の強度調整を行った。結果を図 5 に示す。この図は直径 200 nm の微粒子が 2 つ並んだ状態のサンプルの頂上部をシリアルスキャンした画像である。偏光干渉共焦点信号が微粒子周辺部では十分に低く、微粒子頭頂部で干渉信号が強くピックアップされていることが見て取れる。干渉信号のクロス時部分は 10 nm 以下となっており、同顕微鏡の面内方法の空間分解能は 10 nm を優に達成していることが分かる。



次に同ピックアップ光学系を用いて、先ほど基本分解能の推定に使用したサンプルに

図 6. 微粒子の共焦点偏光干渉信号

対して、ピット信号の再生を試みた。得られたデータを図 6 に示す。通常、一般的な共焦点光学系により微粒子からの散乱信号を測定する場合、得られるデータはガウス型のグラフとなる。即ち、同顕微鏡の共焦点光学系としての基本分解能は図 4 にて測定されたグラフのエンベロープがそれにあたるため、同光学系の基本分解能は 700 nm ということになる。得られる散乱信号はピーク部がガウス型の関数を反映させたものとなる。一方、本研究課題にて開発した偏光干渉共焦点顕微鏡による測定データから分かるように、得られたグラフは球ピーク部を表す先端部が尖った形となることが分かる。即ち空間的な微係数が無限大となる。これにより、ピットを形成するナノ微粒子の力学的なサイズを現在の 200 nm よりもさらに小さくすることができ、これまでよりも小さいピットデータで

も非常に大きなコントラスト信号にてビットデータを再生することが可能となる。

開発したピックアップ光学系がどの程度高い再生信号コントラストを維持しながら微粒子ビットを識別することが可能か否かを調べるため、印刷分野では一般的なコントラスト分解能を測定した。その際、照射光強度を変化させ、色素ドープ微粒子に誘起される非線形性発現の大きさによるコントラスト分解能の違いも評価した。被測定物体の空間周波数を変化させるために、配列間隔の異なる微粒子サンプルを複数用意し、間隔の逆数を空間周波数として定義した。測定により得られたデータを図7に示す。図から明らかとなっており、線形領域のCTFは $1.0 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ 辺りから急激に低下し、 $3.0 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ ほどでほとんど像を分解できない領域まで達する。一方、入射光強度を大きくしていくと、CTF特性が大幅に改善されていく様子が分かる。 $2.5 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ では $5 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ を優に越える空間周波数においても非常に高いコントラストで画像を識別することが可能であることも分かった。

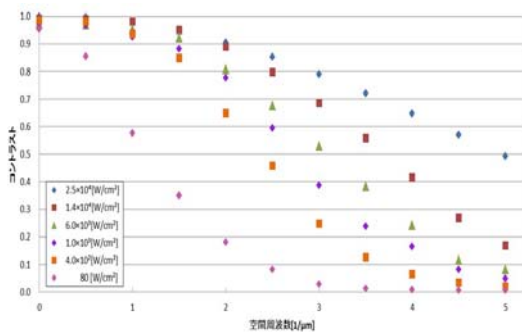


図7. 共焦点偏光干渉ピックアップ光学系のCTF光強度依存性

最後に実際に色素ドープ微粒子にビットデータを記録し、偏光干渉非線形共焦点顕微鏡を利用して、クロック信号及びビットデータ再生を試みた。信号復元には従来と同程度の判別レベルを設定したが、今回開発した顕微鏡を使用すると球トップ部が微係数無限となる波形形状を形成することが確認できているため、この特異な形状を検出することでより小さな微粒子でもビットを記録・再生することが可能となることは先の段落で説明した。実際に記録前後で観測したビットデータ波形を図8に示す。波形が完全に重なると識別しにくくなる為、2つの波形を平面方向に若干シフトさせて記載する。データから明らかなように明ビット(1)を記録することで球からの反射率が大幅に向上していることが分かる(原点付近)。またビット列の

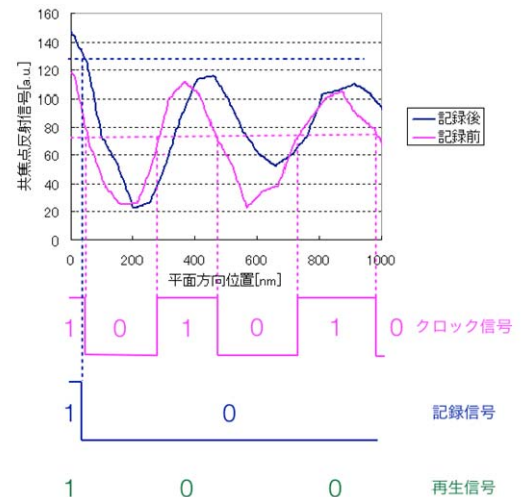


図8. ビットデータの再生結果

再生波形のトップ部も鋭い形状となっていることも確認できる。この波形データからクロック信号を生成し、これを検出窓とすることで記録ビット列100が正確に再生・復元されていることが下のタイミングチャートから示唆される。このデータは直径200nmの微粒子配列ディスクを使用したデータとなっているが、より小さな微粒子でも十分なコントラスト分解能で、ビット列を記録再生することが可能であることも分かった。以上のデータからも示唆されるように、光ディスクに使用したナノ微粒子周辺にパフアリングを形成し、空間分解能が非常に高い偏光干渉強焦点顕微ピックアップ系を併せて利用することで、大幅にディスク容量の増大が期待できる。低NA光学系にて極微小ビットの再生が可能のため、光学系の低価格化という点でも大いに評価できると考える。

また、論文投稿が間に合わなかったため、本報告書では記載していないが、偏光ベクトル多重による量子化も可能であることが確かめられた。

以上の全データから本研究課題で提案した光記録システムは高密度低価格光データストレージとして非常に有用であることが確認できた。

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3件)

- ① T. Okawa, C. Egami, Multi-layered

optical storage media using arranged nano particles, Mol. Cryst. and Liq. Cryst. 査読有, Vol. 568 2012, pp.70-73

② C. Egami, K. Kuwahara, Internal surface measurement of nanoparticle with polarization-interferometric nonlinear confocal microscope, Int. J. Chem. and Env. Eng. 査読有, Vol. 59 2011, pp.1115-1120

③ C. Egami, N. Nishimura, T. Okawa, Jitter-free multi-layered nanoparticles optical storage disk with buffer ring, Opt. Exp. 査読有, Vol. 18, 2010, pp.15901-15906

〔学会発表〕(計6件)

①大野雄平, 和田口由樹, 江上 力, ポリスチレン微粒子による非線形共焦点干渉顕微鏡のCTF測定, 第73回応用物理学会学術講演会, 2012/9/13, 松山

②C. Egami, K. Kuwahara, Internal surface measurement of nanoparticle with polarization-interferometric nonlinear confocal microscope, ICMON 2011, 2011/11/26, Venice

③ T. Okawa, C. Egami, Submicron channel fabrication in photoresist film using CW laser, KJF-ICOMEF 2011, 2011/9/17, Gyeongju

④ C. Egami, T. Okawa, K. Kuwahara, Jitter free nanoparticles optical disk storage, CLEO Pacific Rim 2011, 2011/8/29, Sidney

⑤ C. Egami, Jitter-free nanoparticles optical storage disk with buffer ring, Aust. Inst. of Phys 2010, 2010/12/6, Merborne

⑥ C. Egami, Jitter-free nanoparticles optical disk with confocal microscope, nanoscale VIII, 2010/8/30, Basel

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江上 力 (EGAMI CHIKARA)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号 : 70262798

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :