

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：12201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600070

研究課題名(和文) 光誘起表面振動による揮発性大容量ホログラフィックランダムアクセスメモリの検討

研究課題名(英文) Investigation of volatile holographic random access memory with large amount by photoinduced surface vibration

研究代表者

茨田 大輔 (Barada, Daisuke)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80400711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光駆動デフォーマブル光回折素子(PDDOE)をホログラフィックランダムアクセスメモリとして使用することが検討された。PDDOEはアゾベンゼンポリマー薄膜からなる。また、ホログラフィック記録によって表面変形が誘起された。しかし、この表面構造は記録波長と再生波長が同一であるとき、再生時に消去される。よって、再生時に光誘起表面レリーフ構造を維持する条件を見つけることが重要になるが、信号波と参照波の光強度比が大きいとき、消去時間が遅れることがわかった。これは構造がブレード格子状になっているためと考えられる。加えて、フィードバック光学系を導入するとさらに消去を遅らせることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a photo-driven deformable diffractive optical element (PDDOE) was investigated to use as a holographic random access memory. The PDDOE is made of an azobenzene-containing polymer film. The surface deformation is induced on the film by holographic recording in writing process. However, the surface structure is removed by readout light when the wavelength for writing and reading is identical. Therefore, in order to use the PDDOE as a holographic random access memory, it is important to find a condition that the photoinduced surface structure is maintained in reading process. We found that the reduction duration in reading is delayed when the light intensity ratio between signal and reference beams is large. In the situation, the surface structure becomes like a blazed grating so that high diffraction efficiency is obtained corresponding to surface relief depth. In addition, it is succeed that the reduction duration was delayed further by introducing optical feedback system

研究分野：応用光学

キーワード：光ランダムアクセスメモリ ホログラフィ 光誘起表面変形 アゾベンゼンポリマー

1. 研究開始当初の背景

現在、インターネットの普及に伴って光通信技術が発展してきており、将来的には、機器間や機器内においても光配線が用いられることが予想されている。そのような光化が進んだときに、光信号を電気信号に変えずに、直接処理することが求められる。光信号を直接処理するには、光に含まれる情報を一時的に保存しておく揮発性ランダムアクセスメモリが必要となる。これまでの光を用いたランダムアクセスメモリの研究は、フォトニック結晶導波路を用いたものや [1]、書き換え可能ホログラム [2]を用いるものが検討されている。

大容量の情報を一度に読み書きするためには、書き換え可能なホログラムとして情報を記録することが望ましい。ホログラムは記録情報に応じた屈折率変調された物質からなる。しかし、従来の書き換え可能ホログラムは、フォトリフラクティブ効果やフォトクロミック効果 [3]を用いるため、応答速度(屈折率変調速度)が遅い。また、三次の非線形光学効果を用いると、光強度分布に応じた屈折率変調によって瞬時にホログラムを形成可能であるが、非常に強い光を用いる必要がある。よって、光ランダムアクセスメモリのためには、光強度に対する屈折率変調速度を向上させる新たな方法を検討する必要がある。

2. 研究の目的

上述の従来の書き換え可能なホログラムは、ほとんどが物質内部の屈折率変調によるものであったが、本研究課題では、物質の表面変形による空気と物質の間の屈折率差を用いることを検討する。この場合、通常物質の内部屈折率変調に比べて2桁以上高い変調度となる。屈折率変調されるのは表面に限られるが、光の利用効率を高くすることができる。表面変形は、光の力学的作用を利用して直接的に行うため、速度も速くすることができると考えられる。回折効率は波長や構造の形状にも依存するが、オーダーとしてはわずか数十ナノメートルの表面高低差で数パーセントの回折効率が得られる。ただし、書き換え可能であるということは、記録時に使用した光と同一波長の光で読み出しを行うと、その光からも力を受けて表面構造が小さくなるように変化する。このような場合、物質と反応しない別波長の光で再生する方法もあるが、光情報処理のためのランダムアクセスメモリであることを考えると、再生した光を処理した後、再びランダムアクセスメモリに記録できることが望ましい。よって、同一波長で再生した際に、表面構造の消去を抑制する工夫が必要となる。

そこで、本研究課題では、(1)表面に反射膜をコーティングして、読み出しは表面から行い、書き込みは裏面から行う方法、(2)書き込み時と読み出し時で照射条件を変え、読み出し時には、消去が抑制される条件を用

いる方法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 反射層を用いる方法

実験光学系を図1に示す。記録光には波長532nmの半導体励起固体(DPSS)レーザーを用いた。レーザー光を偏光ビームスプリッタ(PBS)によって二つに分岐し、1/4波長板(QWP)を用いて左右の円偏光にし、記録媒体の裏面から照射した。記録媒体は、ガラス基板上にスピコートされたアゾベンゼンポリマー薄膜を用いた。さらにアゾベンゼンポリマー薄膜の上に、反射層となるアルミニウムを真空蒸着によってコーティングした。読み出しは表面側(反射層側)から行った。図1の実験光学系では、表面側から波長632.8nmのHe-Neレーザー光を照射仕手いるが、これは書き込み時の表面変形をモニターするために用いている。読み出しは表面側から波長532nmのレーザー光を用いて行った。

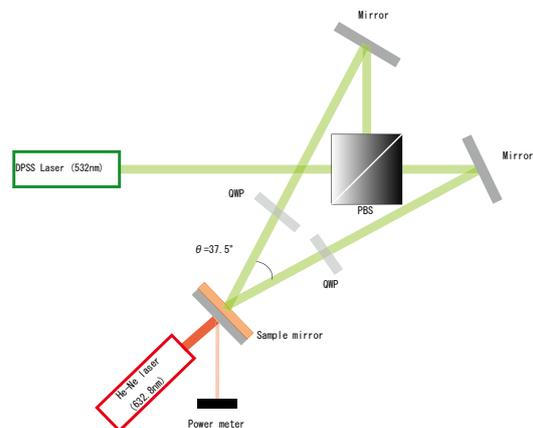


図1 反射層をコーティングした記録媒体への書き込み実験光学系

ここで、アゾベンゼンポリマー薄膜の表面を反射層で完全に覆ってしまうと、表面変形が起こらないことがわかった。これはアルミニウムがほとんど伸縮しないためであると考えられる。そこで、反射層に格子状の切り目をつけることによって表面変形が起こりやすくなるようにした。具体的には、電子ビームリソグラフィによってアルミニウムのパターニングを行った。その工程を図2に示す。まず、①ガラス基板にアゾベンゼンポリマー薄膜をスピコートし、その上に電子線レジストをスピコートした。さらに電子ビームの帯電防止のために、導電膜をコーティングし、②アルミニウムを付着させたい領域に電子ビームを照射した。電子ビーム照射後は水で③導電膜を剥離したのち、現像液によって電子ビームが照射された領域の電子線レジストを溶解させた。この状態で、④アルミニウムを真空蒸着した。このとき、電子ビーム照射した領域はアゾベンゼ

ンポリマー上にアルミニウムが付着し、電子ビームが照射されていない領域は、電子線レジスト上にアルミニウムが付着する。よって、電子線レジストを剥離することによって、電子線レジストごとアルミニウムも取り除くことができる。ただし、電子線レジストの剥離液はアゾベンゼンポリマーも溶解するため、電子線レジストの剥離液を用いずに、⑤全領域に電子ビーム照射して電子線レジストを十分反応させた後、⑥現像液によって電子線レジストを剥離した。

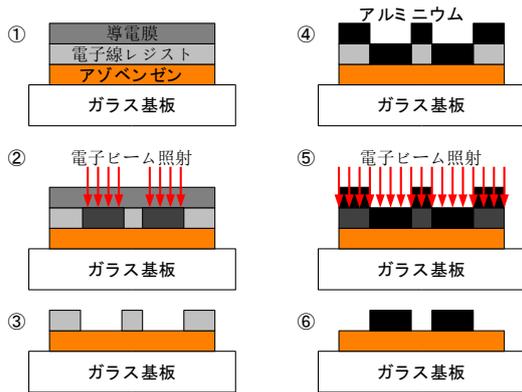


図2 反射層(アルミニウム)のパターニングプロセス

(2) 読み出し時の構造消去の抑制方法

まず、実験の前に光の電磁場から受ける力を理論的に詳細に記述することを検討した。光を物質に照射すると内部に分極電荷と分極電流が生じるが、その分極電荷 ρ_p が電場 \mathbf{E} から受ける力と分極電流 \mathbf{j}_p が磁場 \mathbf{H} から受ける力を考えた。その力は、

$$\mathbf{f} = \rho_p \mathbf{E} + \mu_0 \mathbf{j}_p \times \mathbf{H} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 μ_0 は真空の透磁率である。この式を変形し、一周期あたりの時間平均を求めると、

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{f} \rangle = & -\frac{\epsilon_0 \chi}{2} \text{Re} [(\nabla \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E}^*] \\ & + \frac{\epsilon_0 \chi'}{2} \text{Im} [(\nabla \cdot \mathbf{E}) \mathbf{E}^*] \\ & + \frac{\omega \chi}{2c^2} \text{Im} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \\ & + \frac{\omega \chi'}{2c^2} \text{Re} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率、 $\chi + i\chi'$ は複素電気感受率、 c は光速である。この式の第1項と第2項は表面のみに働く応力であり、第3項と第4項が内部に働く力となる。第1項と第2項は影響が小さいので無視し、第3項と第4項に注目した。これに実験条件による光電磁場を与えると、力の分布を計算することができる。

以前より、表面からの照射において、表面変形の起こりやすさが偏光に大きく依存することはわかっていたが、導出した理論式に

より、さらに表面からの照射と裏面からの照射によって偏光依存性が変わることがわかった。また、干渉させる二つのビームの比が異なると、構造がブレード格子状に傾くことも予想された。読み出し時の構造の消去は、構造の高低差が大きいほど起こりやすいが、ブレード格子状になると、同じ高低差の構造物で比較すると回折効率が高くなることが予測される。よって、ブレード格子状になるほど消去による回折効率の減少が小さくなると予測し、その検証実験を行った。

実験光学系を図3に示す。波長532nmのレーザー光を拡大し、PBSによって分岐するが、分岐比は1/2波長板(HWP)を回すことによって調整した。また、分岐後にもHWPを用い、紙面に平行に電場が振動する二つのp偏光のビームを記録媒体照射して書き込みを行った。読み出しは、一方のビームを遮断して行った。

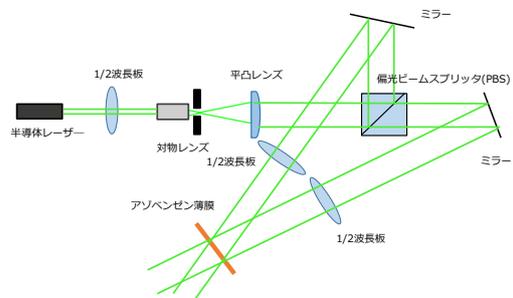


図3 強度比を変えて書き込みを行う実験光学系

さらに、図4のような実験光学系を用い、読み出し時に読み出された光を書き込み側にフィードバックすることによって、再書き込みを行い、構造の消去を抑制することを考えた。読み出された光はHWPによって偏光を回転し、PBSによって一部をパワーメーターに、一部をアゾベンゼンポリマーへの入射側にフィードバックした。

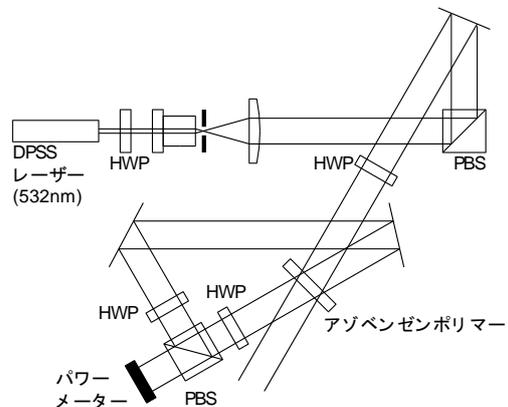


図4 フィードバック機構を有する読み出し光学系

4. 研究成果

(1) 反射層を用いる方法の結果

電子ビームリソグラフィを用いて電子線レジストをパターンニングした結果を図5に示す。ここで格子の周期は $1\mu\text{m}$ とし、矩形のアルミニウム間の間隔は 200nm となるように設計した。また、図1の実験光学系では、干渉縞の周期が $2\mu\text{m}$ になるように光学系の調整を行った。裏面から書き込める際に、表面から He-Ne レーザー光を照射し、その回折光の経時変化をモニターした結果を図6に示す。この図のように回折光強度が時間とともに上昇していく様子がわかる。ここで、20分程度書き込みを行った後の回折効率率は約0.1%程度まで上昇し、表面構造の高低差に換算すると約 6nm となった。また、図7のように表面から書き込みに使用した波長 532nm の光を照射しても、回折効率は変化せず、構造は維持されることがわかった。

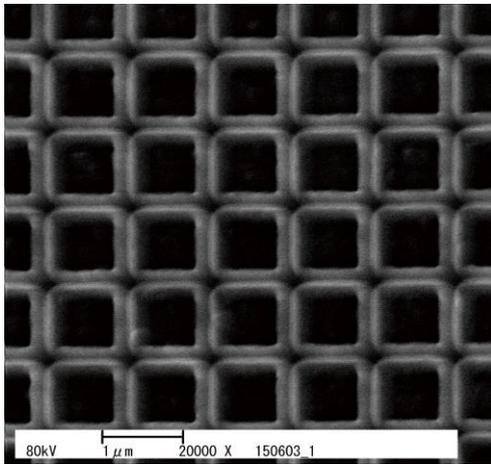


図5 電子ビームリソグラフィによるパターンニング結果の SEM 画像

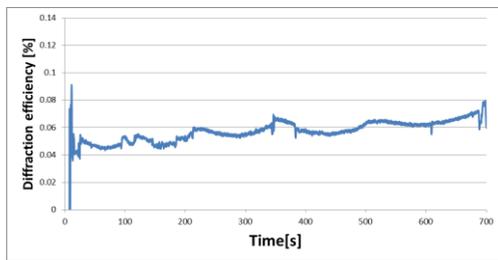


図6 図1の実験光学系における回折光強度の経時変化

しかし、使用したアゾベンゼンポリマー薄膜は、同様の書き込み時間で 200nm 程度の表面変形を起こせることが過去の研究でわかっているが、それに比べて10分の1以下という小さな表面変形となった。この理由として、アルミニウムに切り目をいれることによって表面変形が可能となったが、それでもま

だ抑制が強いことが考えられる。また、 200nm 以上の表面変形の実験例は、アゾベンゼンポリマー薄膜の表面からの照射によって達成されたが、ここでは表面はアルミニウムで覆われており、裏面からの書き込みであったことが考えられる。表面からの書き込みの場合、同書き込み条件で100倍程度の回折効率が得られるため、反射層を用いずに読み出し時に表面構造が消去されない条件の探索を行った。

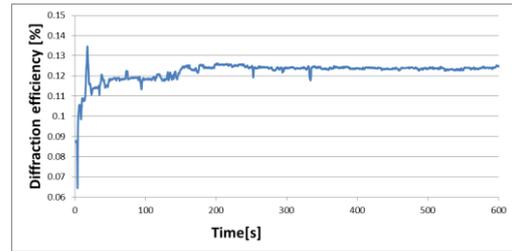


図7 反射層のある表面から読み出しを行ったときの回折効率の経時変化

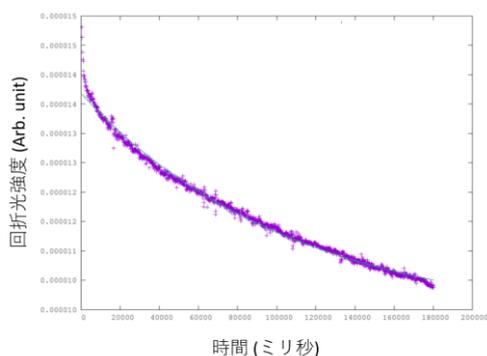
(2) 読み出し時の構造消去の抑制結果

図3の書き込み時の二つのビームの強度比を変えた場合の実験結果を図8に示す。図では、PBSで分岐前の $1/2$ 波長板の角度を横軸にとっているが、0度のとき強度比が1:1になり、45度に近づくと1:0に近づく。また、 p 偏光による読み出しと s 偏光による読み出しの比較を行った。図を見ると、強度比に関わらず、 p 偏光のほうが、消去時間が長くなることがわかった。また、予測の通り、強度比が大きくなるほど、消去時間が長くなることが確認された。よって、読み出しは p 偏光で行うことが望ましく、さらに書き込み時には強度比が大きしておくことが望ましいことがわかった。一般に信号光の大きさを大きくするには信号増幅機能が必要であるため難しいが、情報のない参照光はレーザー光のパワーを上げればよいので、弱い信号光に対して強い参照光を重ねることは都合がよいと考えられる。

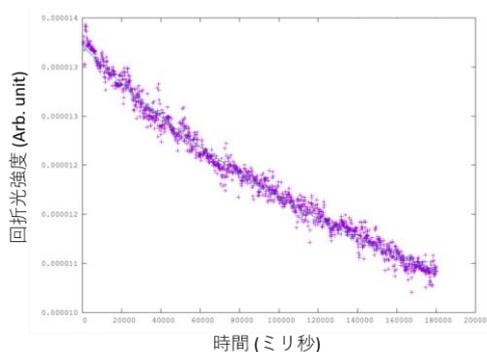


図8 書き込み時の強度比を変えたときの読み出し光による構造の消去時間

図4のフィードバックを用いた読み出し結果を図9に示す。図9は読み出しによる回折効率の減少を、フィードバックを用いた場合と用いない場合で比較を行った結果である。図のデータを指数関数によってフィッティングし、消去時間を見積もると、フィードバックを行ったほうが、消去時間が4倍程度長くなっていることが確認できる。ただし、フィードバック時に位相を合わせる機構は用いていないため、読み出された光とフィードバックによる再書き込み光の位相はずれていると考えられるそのため、読み出された光と再書き込み光が強め合うように干渉する場合と、破壊的に干渉する場合があります、不安定な結果になっていると考えられる。読み出された光と再書き込み光が常に強め合う干渉をするように調整することによって、さらに消去の抑制が可能であると考えられる。



フィードバックなし



フィードバックあり

図9 フィードバック機構を用いたときの回折光強度の経時変化

<引用文献>

[1] K. Nozaki et al., Nature Photonics, 6, 248 (2012)
 [2] E. Chuang et al., Proc. IEEE, 87, 1931 (1999)
 [3] N. Ishii et al., Scientific Reports, 2, 819 (2012)

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 1 件)

- ① 戸澤諒麻、茨田大輔、川田重夫、Measurement of repetitive surface displacement modulation induced by illuminating femto-second laser pulses、Proceedings of SPIE、査読有、9598 巻、2015、95980H-1-8
DOI: 10.1117/12.2189448

[学会発表] (計 10 件)

- ① 戸澤諒麻、茨田大輔、川田重夫、吸収膜・反射膜積層構造を用いた大面積光位相変調、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学札幌キャンパス(北海道・札幌市)、2014 年 9 月 17 日~20 日
- ② 戸澤諒麻、茨田大輔、川田重夫、光吸収による音波発生を利用した光駆動デフォーミブルミラーの作製、応用物理学会日本光学会第 15 回情報フォトンクス研究グループ研究会、あうる京北(京都府立セミナーハウス)(京都府・京都市)、2014 年 9 月 22 日~24 日
- ③ 戸澤諒麻、茨田大輔、川田重夫、Measurement of repetitive surface displacement modulation induced by illuminating femto-second laser pulses、SPIE Optics + Photonics 2015、San Diego Convention Center (San Diego, CA, USA)、2015 年 8 月 9 日~13 日
- ④ 戸澤諒麻、茨田大輔、川田重夫、光誘起表面レリーフ形成を利用したデフォーミブルミラーの作製、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)、2015 年 9 月 13 日~16 日
- ⑤ 鈴木良太朗、川田重夫、茨田大輔、サブ波長構造を用いた円偏光ホログラムの作製、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)、2015 年 9 月 13 日~16 日
- ⑥ 茨田大輔、福田 隆史、アゾポリマー薄膜における光誘起表面レリーフ形成の偏光依存性、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)、2015 年 9 月 13 日~16 日
- ⑦ 茨田大輔、福田隆史、アゾポリマー薄膜における光誘起表面レリーフ形成の偏光依存性(II)、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)、2016 年 9 月 13 日~16 日
- ⑧ 大和田聖人、茨田大輔、アゾベンゼンポリマーの光誘起表面レリーフグレーティングの破壊的回折特性、日本光学会情報フォトンクス研究グループ第 11 回関東学生研究論文講演会(栃木県・宇都宮市)、宇都宮大学陽東キャンパス、2017 年 3 月 7 日
- ⑨ 鈴木良太朗、茨田大輔、サブ波長構造を

用いた白色光再生円偏光光渦ホログラム
の設計、第 64 回応用物理学会春季学術講
演会、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)、
2017 年 3 月 14 日～17 日

- ⑩ 茨田大輔、福田隆史、任意曲面間の光伝
播解析のための座標変換を用いた微分方
程式の導出、第 64 回応用物理学会春季学
術講演会、パシフィコ横浜(神奈川県・横
浜市)、2017 年 3 月 14 日～17 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

茨田 大輔 (BARADA, Daisuke)
宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：8 0 4 0 0 7 1 1

(4) 研究協力者

戸澤 諒麻 (TOZAWA, Ryoma)
鈴木 良太朗 (SUZUKI, Ryotaro)
大和田 聖人 (OWADA, Masato)