

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560413

研究課題名(和文)近接場光アンテナ励起局所円偏光生成による次世代高速度・高密度磁気記録

研究課題名(英文)Ultra-fast and ultra-high density magnetic recording applying localized circularly polarized near-field light generated by plasmon antenna

研究代表者

中川 活二 (NAKAGAWA, Katsuji)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：20221442

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：光誘起磁化反転現象を用いた超高速・高密度磁気記録実現を目指し、(1)円偏光をナノメートルサイズに絞り込む手法の確立、(2)表面プラズモン共鳴応答の過渡応答解明、(3)高速・高密度記録の実証基礎実験を検討した。その結果、クローバ開口型アンテナと孤立微粒子媒体の組み合わせで、円偏光を一孤立微粒子に集中して生成可能であることを示した。また、プラズモニック導波路を伝搬する表面プラズモンポラリトンから円偏光を生成可能であることを示した。その過渡解析から円偏光生成に50 fs程度の時間を有していることがわかった。本アンテナを用いた微小記録実証実験で、62 nm×67 nmの微小記録マークを実現した。

研究成果の概要(英文)：For an ultra-fast and ultra-high density magnetic recording using a photo-induced magnetization reversal phenomenon, we studied 1) establishing a method of confining circularly polarized light into an order of nano-meter size, 2) clarifying transient response of surface plasmon resonance, and 3) verifying an ultra-fast and ultra-high density recording. As a result, a confined small circularly polarized light in an isolated particle medium was confirmed by using both a four-leaf clover aperture and an isolated particle medium. It was shown that the circularly polarized light was able to be generated from surface plasmon polaritons, which propagated at an interface between a metal and a dielectric material. It is found that the circularly polarized light was excited in ~50 fs by a transient response analysis. A tiny magnetic recording mark of 62 x 67 nm² were written by optical near field generated by a plasmon antenna using a 90-fs pulsed laser.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：記憶・記録 近接場光 データストレージ 磁気記録 熱工学 マイクロナノデバイス 電子・デバイス機器

1. 研究開始当初の背景

磁気記録(ハードディスク)技術には、磁気共鳴周波数で決定される物理的記録速度限界がある。現在、この記録速度限界に近づいており、ブレークスルーとなる発明・発見が必要であった。まさにこの時期に、フェムト秒レーザを利用した従来の物理限界に制限されない高速の記録手法を連携研究者(伊藤、塚本)らが発見した。この手法は、磁場を印加せずに、右回り円偏光あるいは左回り円偏光のフェムト秒レーザを垂直磁化膜に照射することで磁区を記録できる。更に、従来の磁気共鳴周波数で決まる GHz の記録速度限界を、1000 倍の THz オーダーの記録速度に向上できる。しかし、光を使うため、光スポットサイズを波長オーダーのサイズまでしか集光できず、磁気記録で行われている高密度記録には不向きであった。

そこで研究代表者は、従来から行ってきた表面プラズモン技術を利用した近接場光誘起の局所的円偏光生成による解決法を提案する。本手法は、磁気記録にレーザ光加熱を応用して高密度化するものであり、近接場光を利用することで数十 nm のサイズに光を絞ることが可能である。

前述の円偏光を小さな領域に集光するために、近接場光による高密度化のテクニックを使う事が一つの方法と考えるが、どのように近接場光を活用するかがキーポイントとなる。そこで、表面プラズモンアンテナの特質を見極め、両者を融合する従来の限界を打ち破る超高速・超高密度の新規な記録原理を実証することが必要である。

2. 研究の目的

磁気記録技術が現在直面している「超高速・高密度」の壁を打破する円偏光超短パルスと近接場手法の融合実現のための具体的な研究目的は、(1)円偏光をナノメートルサイズに絞り込む手法を確立、(2)表面プラズモン共鳴応答の過渡応答解明、(3)高速・高密度記録の実証基礎実験である。この研究で、物理的限界に直面した磁気記録の大きな問題を打破できる。

3. 研究の方法

(1)近接場アンテナ設計とシミュレーション解析

4 回対称の表面プラズモンアンテナは、円偏光に共鳴することはすでに報告があるが、記録媒体との相互作用について研究は行われていない。我々は、記録媒体上でナノサイズの領域に円偏光を生成できるかをシミュレーションで基礎検討し、その実現可能性を見いだした。今後、記録媒体内部で円偏光を生成する手法を研究し、高密度記録を可能にする手法を確立する。

(2)表面プラズモン共鳴の過渡応答解析

表面プラズモン共鳴を利用したアンテナでは、共鳴現象を利用しているので、フェムト秒オーダーの光パルスに対して、実際にその共鳴効果が得られるかという問題がある。そこで、表面プラズモン現象の過渡応答解析についてもシミュレーション検討し、実用化に向けた検証を行う。

(3)高速度・高密度記録の実証基礎実験

設計した表面プラズモンアンテナのナノサイズ加工を行い、基礎的な記録実験を行う。これによって、基礎実証と同時に実用上の問題点があるかを明確化し、テラヘルツ高速記録とテラビット高密度記録を実現するための基礎実証をする

4. 研究成果

(1) 近接場アンテナ設計とシミュレーション解析

粒子媒体を用いた 4 回対称のクローバー開口型アンテナの中心近傍の電磁界解析を Finite-Difference Time-Domain (FDTD)法により行った。シミュレーションモデルを図 1 に示す。アンテナ構造はクローバー型の開口アンテナとし、 $L = 160 \text{ nm}$ 、 $W_1 = 20 \text{ nm}$ 、 $W_2 = 60 \text{ nm}$ とした。記録媒体には粒径 $r = 15 \text{ nm}$ 、粒間 $s = 10 \text{ nm}$ 正方配置構造の円柱型媒体を用いて、媒体アンテナ間距離 5 nm として配置した。アンテナ材料には Au、媒体材料には Co を用いた。波長 $\lambda = 780 \text{ nm}$ の円偏光の進行方向を +Z 方向として入射し、強度分布が中心ピーク電界 1 V/m のガウシアン分布とした。中心の粒子において高い電界強度の円偏光を生成できるか解析を行った。評価方法として選択した粒子(#1)および、隣接粒子(#2)の記録媒体表面の位置で拡張したストークスパラメータ円偏光度 C 、電界強度 I 、記録媒体方向に対するポインティングベクトル S の方向余弦 $S_z / |S|$ を評価した。

4 回対称性のクローバー開口型アンテナと孤立微粒子媒体とを組みあわせることにより、選択粒子(#1)にのみ高い電界強度 I で高い円偏光度の光を生成可能であることを示した。その結果を図 2, 3 に示す。

さらに記録時には、アンテナと媒体の位置ずれ等の影響を考慮することが重要になってくるため、クローバー開口型アンテナ形状

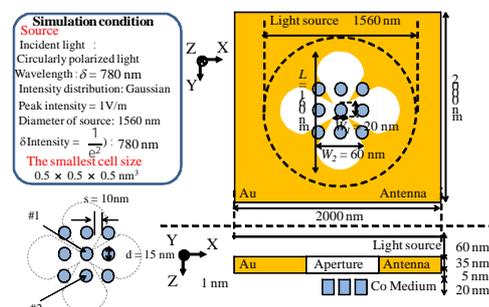


図 1 円偏光計算モデル

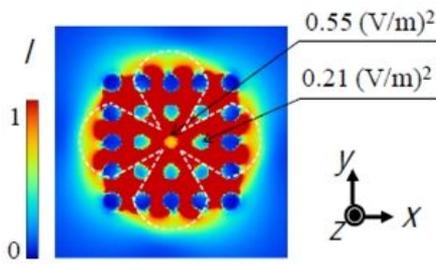


図2 電界強度 I の分布

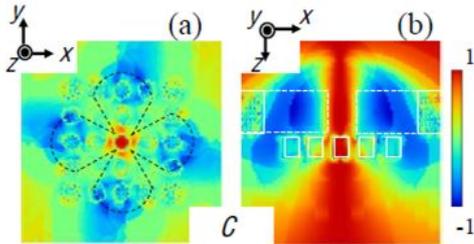


図3 円偏光度 C の分布. 鳥瞰図(a)及び断面図(b)

と微粒子媒体を組み合わせる手法で、記録位置がどの程度移動しても選択した単一粒子(#1)に電界強度の高い円偏光が生成可能か記録位置依存性の検討を行った。

アンテナ中心部が X nm, Y nm 変化した際の選択粒子(#1)の各値の変化を分布図で図4に示す。アンテナを $X = \pm 10$ nm, $Y = \pm 10$ nm ずらした際、円偏光度 C が低く電界強度 I が高いことから記録情報が消えてしまう可能性がある。しかし、粒子間隔 25 nm に対し 5 nm 程度までアンテナがずれてもアンテナ移動時に急激に円偏光度 C , ポインティングベクトルの方向余弦 $S_z / |S|$, 電界強度 I が変化することなく選択粒子(#1)に電界強度の高い局所円偏光が生成可能であること

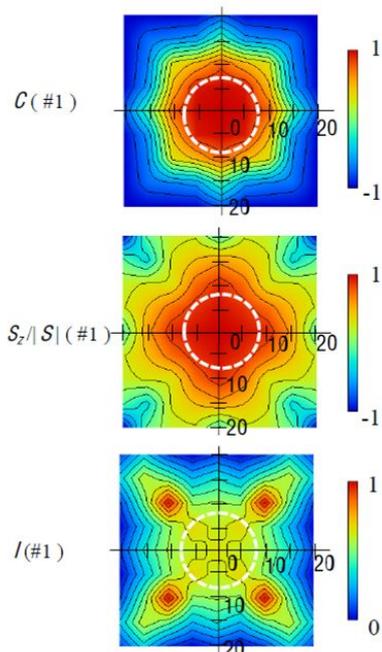


図4 記録位置マージン評価

が明らかになった。

さらに表面プラズモンアンテナへの効率的な光エネルギーの伝搬方法として、表面プラズモンポラリトンを使ったプラズモニック導波路を用いる光学系構成において、導波路終端部に設置したプラズモンアンテナによって円偏光生成を実現できることを示した。電界の各方向成分の時間変化を図5に示す。

(2) 表面プラズモン共鳴の過渡応答解析

図5に示したように、電界強度の時間変化を調査することで、円偏光の形成に 50 fs 程度の時間が必要であることがわかった。

(3) 高速度・高密度記録の実証基礎実験

プラズモン導波路における光利用の高効率化およびプラズモンアンテナを用いた近接場光による高集光化の実証を行った。

表面プラズモンアンテナへの効率的な光エネルギーの伝搬方法として、FDTD法を用いて、誘電体導波路と表面プラズモンエネルギー伝搬とを組み合わせた光伝搬手法に取り組んだ。表面プラズモンの伝搬状態の解析から、表面プラズモンが伝搬する界面の選択および薄膜構造による伝搬条件の最適化を行った。伝搬した表面プラズモンを近接場アンテナ先端に集光することで、媒体表面において 10 nm の微少電界強度分布が得られることを電磁界計算により示した。

一方、高密度化に対し、近接場光を用いたフェムト秒レーザーによる熱アシスト磁気記録実証実験による微少記録マークの実現を目指した。電磁界と熱伝導シミュレーション解析、アンテナ構造設計と電子ビーム露光による試作、およびフェムト秒レーザーによる記録の一連の実験を行い、媒体に直接プラズモンアンテナを積層する構造を用いて、近接場光を用いた世界初のフェムト秒レーザーによる熱アシスト磁気記録実証実験に成功した。この実験より 166 nm × 120 nm の記録マークを実現した。磁気力顕微鏡による作製のアンテナの凹凸像と磁気像を図6(a), (b)にそれぞれ示す。さらに電磁界解析によりアンテナ構造の改良を行い、棒形状よりも正方形の場合に高い電界強度が得られることを示

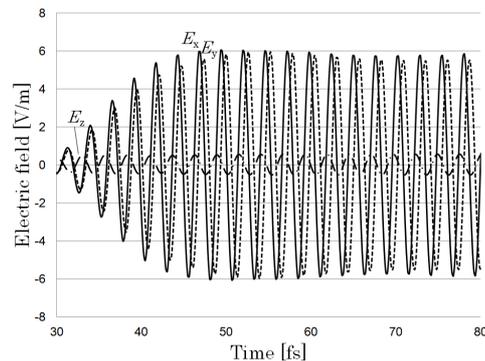


図5 プラズモニック導波路終端部に設置した円偏光用プラズモンアンテナ中心位置の電界強度の時間変化

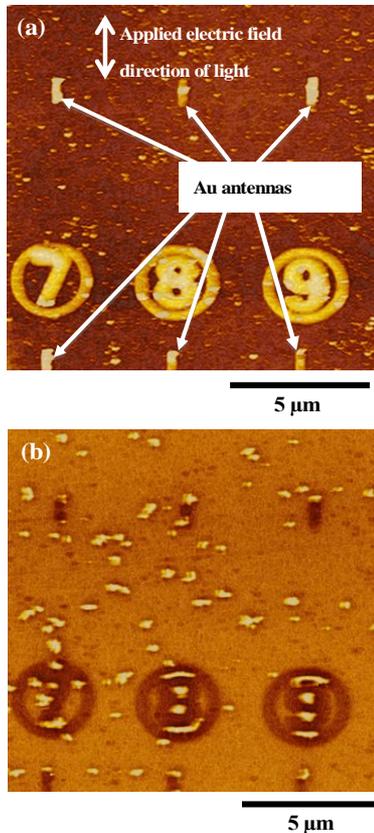


図 6 媒体上に直接作製したプラズモンアンテナに 90 fs のレーザー光を照射して記録した磁区像・磁気力顕微鏡による表面凹凸像(a)と磁気像(b)。

し、媒体に直接正方プラズモンアンテナを積層する構造を用いて、62 nm × 67 nm の微少記録マークも実現した。これにより、光照射領域の広い高強度短パルスレーザーを用いても、プラズモンアンテナ先端の近接場光のみを活用することで微少記録が可能であることを示した。

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 8 件)

- (1) Kyosuke Tamura, Yoshito Ashizawa, Shinichiro Ohnuki, and Katsuji Nakagawa, "Design of High Efficient Plasmonic Waveguide and Antenna for Thermally Assisted Magnetic Recording", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 38, pp. 131-134, May 1, 2014.
- (2) 大貫進一郎, 中川活二, 芦澤好人, 塚本新, 伊藤彰義, "新規な次世代超高速超高密度磁気記録に向けた取組", 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌), 査読無, Vol. 134, No.1, pp.26-29 Jan. 2014.
- (3) K. Nakagawa, A. Tajiri, K. Tamura, S. Toriumi, Y. Ashizawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, Y. Sasaki, S. Saito, M. Takahashi, and S. Ohnuki, "Thermally Assisted Magnetic Recording Applying Optical

Near Field with Ultra Short-Time Heating", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 37, pp. 119-122, May 23, 2013.

- (4) K. Tamura, T. Ota, Y. Ashizawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, S. Ohnuki, and K. Nakagawa, "Circularly Polarized Light Generated by Plasmon Antenna for All-Optical Magnetic Recording", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 37, pp. 115-118, May 23, 2013.
- (5) Yoshito Ashizawa, Takeshi Ota, Kyosuke Tamura, and Katsuji Nakagawa, "Highly Efficient Waveguide by Using Surface Plasmon Polaritons for Thermally Assisted Magnetic Recording", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 37, pp. 111-114, May 23, 2013.
- (6) 中川活二, 芦澤好人, 塚本新, 伊藤彰義, 遠藤拓, 上坂保太郎, 新妻清純, 移川欣男, "近接場光を用いた熱アシスト磁気記録とナノ粒子記録媒体", 日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル, 査読有, No. 129, pp. 11-18, Oct. 26, 2012.
- (7) T. Ota, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, S. Ohnuki, H. Iwamatsu, A. Tsukamoto, and A. Itoh, "Dependence of Circularly Polarized Light Excited by Plasmon Aperture on Relative Position to Magnetic Particles for All-Optical Magnetic Recording", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 36, pp. 66 - 69, Jan 1, 2012.
- (8) Katsuji Nakagawa, Yuji Osa, Atsumu Tajiri, Yoshito Ashizawa, Shinichiro Ohnuki, Yuzo Sasaki, Shin Saito, Migaku Takahashi, and Akiyoshi Itoh, "Test Method for Thermally Assisted Magnetic Recording Applying Surface Plasmon Antennas Stacked on Magnetic Layer", J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 36, pp. 58-61, Jan. 1, 2012.

〔学会発表〕(計 28 件)

- (1) 中川活二, "表面プラズモンを活用した熱アシスト磁気記録", 磁気記録・情報ストレージ研究会 (MR), (10)MR, 2013 年 12 月 13 日, 愛媛大学.
- (2) Kyosuke Tamura, Yoshito Ashizawa, Shinichiro Ohnuki, and Katsuji Nakagawa, "DESIGN OF HIGH EFFICIENT PLASMONIC WAVEGUIDE AND ANTENNA FOR THERMALLY ASSISTED MAGNETIC RECORDING", Magnetics and Optics Research International Symposium (MORIS) 2013, We-P-25, Dec. 4, 2013, OMIYA SONIC CITY, Saitama, Japan
- (3) 芦澤好人, 田村京介, 林慶彦, 大貫進一郎, 中川活二, "伝搬型及び局在型表面プラズモンを活用した熱アシスト記録磁気ヘッド", 第 56 回ナノマグネティクス専門研究会, 4, 2013 年 11 月 29 日, 中央大

学駿河台記念館.

- (4) Katsuji Nakagawa, Kyosuke Tamura, Yoshito Ashizawa, and Shinichiro Ohnuki, "Highly Efficient Plasmonic Waveguide for both All-Optical Magnetic Recording and Thermally Assisted Magnetic Recording", 58th Annual Conference on MMM, CT-02, Nov. 6, 2013, Denver, Colorado, USA.
- (5) K. TAMURA, Y. HAYASHI, Y. ASHIZAWA, S. OHNUKI, and K. NAKAGAWA, "Structural Analysis of Highly Efficient Plasmonic Waveguide for Thermally Assisted Magnetic Recording" The 24th Magnetic Recording Conference (TMRC 2013), P15, Aug 21, 2013, Tokyo Institute of Technology, Ookayama Campus, Tokyo, Japan.
- (6) K. Nakagawa, K. Tamura, Y. Ashizawa, S. Ohnuki, "Circularly Polarized Light Created by Surface Plasmon Polaritons for All-optical Magnetic Recording", The 3rd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA 2013), RE-06, July 23, 2013, Taichung, Taiwan.
- (7) 中川活二, "ストレージ分野での表面プラズモンの活用", アモルファス・ナノ材料第147委員会 第118回研究会, 2012年12月7日, 主婦会館, 東京.
- (8) 中川活二, "熱アシスト磁気記録実現への課題およびプラズモン導波路活用の検討", IDEMA JAPAN (日本HDD協会) クォータリセミナー, 5, 2012年10月12日, 発明会館, 東京.
- (9) T. Ota, K. Tamura, Y. Ashizawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, S. Ohnuki, and K. Nakagawa, "Circularly Polarized Light Generated by Plasmon Antenna for All-Optical Magnetic Recording", International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS) 2012, 2pA-4, Oct. 2nd, 2012, Nara, Japan.
- (10) Y. Ashizawa, Ta. Ota, K. Tamura, and K. Nakagawa, "High Efficient Waveguide by Using Surface Plasmon Polaritons for Thermally Assisted Magnetic Recording", International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS) 2012, 2pA-3, Oct. 2nd, 2012, Nara, Japan.
- (11) A. Tajiri, K. Tamura, S. Toriumi, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, A. Tsukamoto, A. Itoh, Y. Sasaki, S. Saito, M. Takahashi, and S. Ohnuki, "Thermally Assisted Magnetic Recording Applying Optical Near Field with Ultra Short-Time Heating", International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies

- (ICAUMS) 2012, 2pA-2, Oct. 2nd, 2012, Nara, Japan.
- (12) Y. Ashizawa, T. Ota, and K. Nakagawa, "High efficient near-field antenna with plasmonic waveguide for thermally assisted magnetic recording", 2012 IEEE International Magnetism Conference, CC-06, May 9, 2012, Vancouver, Canada.
- (13) T. Ota, Y. Ashizawa, K. Nakagawa, S. Ohnuki, H. Iwamatsu, A. Tsukamoto, and A. Itoh, "Dependence of Circularly Polarized Light Excited by Plasmon Aperture on Relative Position to Magnetic Particles for All-Optical Magnetic Recording", Magnetism and Optics Research International Symposium (MORIS) 2011, P82, p. 150, Jun. 22, 2011, Nijmegen, The Netherlands.
- (14) K. Nakagawa, Y. Osa, A. Tajiri, Y. Ashizawa, S. Ohnuki, Y. Sasaki, K. Inoue, S. Hinata, G.X. Du, S. Saito, M. Takahashi, and A. Itoh, "Thermally Assisted Magnetic Recording Test Method Applying Surface Plasmon Antenna Stacked on Granular Media", Magnetism and Optics Research International Symposium (MORIS) 2011, P102, Jun. 22, 2011, Nijmegen, The Netherlands.

[その他]

ホームページ等

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/40/0003998/profile.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中川 活二 (NAKAGAWA, Katsuji)
日本大学・理工学部・教授
研究者番号: 20221442

(2)研究分担者

(3)連携研究者

伊藤 彰義 (ITO, Akiyoshi)
日本大学・名誉教授
研究者番号: 60059962

大貫 進一郎 (OHNUKI, Shinichiro)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80386002

塚本 新 (TSUKAMOTO, Arata)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号: 30318365

芦澤 好人 (ASHIZAWA, Yoshito)
日本大学・理工学部・助教
研究者番号: 10453911