

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18735

研究課題名（和文）高速光通信光で直接光磁気記録するレーストラックメモリの提案と実証への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to propose and demonstrate racetrack memory for direct optical magnetic recording with high-speed optical communication light

研究代表者

栗野 博之（AWANO, HIROYUKI）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40571675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：GdFeCo磁性細線上の磁壁をパルス電流で駆動する磁性細線メモリにおいて、パルス幅を短くすると外部磁界の助けを借りることなく無磁場でも磁壁の移動速度を2000m/secに高速化できることを見出した。このデータ入力に光パルスを使う超高速光磁気記録を提案した。従来の光磁気記録における磁区の移動速度は50m/sec程度なので、この新しい提案によりデータ転送レートを40倍高速化できる。ただし、光通信短パルス光パワーは従来の光磁気記録に比べて40分の1になるので蓄熱構造が重要であり検討を行った。高速磁壁駆動には重金属層Ptヘテロ構造が重要だが、これは高感度光磁気記録にも有用であることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Society5.0では、データセンターへのビッグデータ蓄積に必要な消費電力の急増が大問題になっている。この原因は高速な光通信信号を光電変換して半導体メモリに記録するシステムにある。そこで、本提案のように光通信光を直接電流駆動型磁性細線メモリに照射して光磁気記録できればデータセンターの消費電力を100分の1に低減することが可能となる。磁壁の移動速度が2000m/secで、最短記録ビット長を100nmとした場合、データ転送レートは20Gbpsとなり、提案の実現性にマッチする。この手法により光電変換と半導体メモリへの記録電力が不要となり、革新的にデータセンターの消費電力を低減することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In a magnetic nanowire memory in which the domain wall on a GdFeCo magnetic nanowire is driven by a pulsed current, we found that the domain wall movement speed can be increased to 2000 m/sec without the help of an external magnetic field by shortening the pulse width. We proposed ultra-high-speed magneto-optical recording using optical pulses for data input. Since the magnetic domain movement speed in conventional magneto-optical recording is about 50 m/sec, this new proposal can increase the data transfer rate by a factor of 40. However, since the short-pulse light power for optical communication is 1/40 of that for conventional magneto-optical recording, the heat storage structure is important, and we investigated it. The heavy metal layer Pt heterostructure is important for high-speed domain wall drive, and we found that it is also useful for high-sensitivity magneto-optical recording.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：磁性細線メモリ 超高速光磁気記録 高速データレート 高速磁壁移動速度 高感度光磁気記録 短パルス電流高速磁壁駆動 DMI高感度光磁気記録 超低消費電力

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

世界中いたるところインターネットにつながっている IoT で情報をビッグデータとして蓄え、人工知能でイノベーションアイデアを創出する。このような DX 革命が起きている。このビッグデータは、世界中に乱立しているデータセンターに光回線を使って送られる。そこで、大きな問題になっているのが通信系の電力問題である。現在、データセンターにきた光通信データは光電変換素子で電気信号に変換され、大量の SRAM に保存される。光電変換素子の消費電力は 100fJ/bit、SRAM の消費電力は 20000fJ/bit とすごく大きい。光ファイバーからの光信号のデータレートは 100Gbps と高速だが、SRAM のデータレートは 1Gbps と光通信速度の 100 分の 1 である。したがって、全部の光通信データを受け取って記録するためには 100 個の SRAM で並列記録する必要がある。このように、光電変換素子、SRAM の消費電力低減が喫緊の課題である。そこで、我々が研究で取り組んでいる GdFeCo/Pt 磁性細線に光ファイバーの信号を直接記録する方法を思いついた。GdFeCo は私が長年企業にて研究開発してきた光磁気記録材料であり、この材料で磁性細線を作り、パルス電流で記録磁区列を高速シフトすることに成功している。光磁気ディスクの場合、最速でも磁区の移動速度は 50m/sec のため、光通信の転送速度では使えなかったが、GdFeCo 磁性細線の磁区の移動速度 2000m/sec であれば、高速データレートに対応できる。なお、この GdFeCo 磁性細線のシフト電力は 1fJ/bit と小さい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我々が研究で取り組んでいる GdFeCo/Pt 磁性細線に光ファイバーの光信号で記録再生できるか、その可能性を検討することである。可能であれば、光電変換素子は不要になり、かつ大量の SRAM も不要となるため、革新的に光通信信号記録電力を削減することが可能になる。当然、導入コストも革新的に低減できる。

3. 研究の方法

磁性細線の作製には、一般的なリフトオフ法とナノインプリント法を用いた。磁性細線の作製には超高真空マグネトロンスパッタ装置を用い、基板上に下地膜、磁性膜、カバー層を成膜した。記録膜組成は Gd ターゲット、FeCo ターゲットのコスパッタによりそれぞれのスパッタリングパワーで調整した。また、本研究経費でスパッタ電極を追加できたため、成膜効率を飛躍的に改善することができた。この試作した磁性細線をネオアーク製偏光顕微鏡の試料ステージにセットし、ピコセカンド社のパルス電流印加装置で 100nsec 以下のパルス電流を印加して、磁性細線上の磁壁の動く様子を詳細に観察した。また、この偏光顕微鏡には光通信に用いる波長 1310nm の半導体レーザーが搭載されており、対物レンズで集光した光で磁性細線上に記録磁区を形成することができる。また、記録磁区をパルス電流で移動し、この移動磁区に波長 780nm のレーザーで直線偏光を照射し、偏向角の変化から移動磁区のリアルタイム測定を行った。プラスチック基板上への磁性細線作製法にはナノインプリント装置を用いた。

4. 研究成果

図 1 (a)には、GdFeCo/Pt 磁性細線に複数の記録磁区を記録し、電流パルスを印加した時の磁区列の動く様子を示した。この磁区列の移動距離を縦軸に、印加パルス電流の数を横軸に示したのが図 1 (b)である。磁区の移動距離は印加電流パルスの数に正比例しており、正確な磁区移動が可能であることを示す。また、図 1 (c)には、磁区の移動速度の印加電流密度依存性を示した。磁壁移動速度は印加電流密度に比例し、最大の電流密度を印加した時、磁壁移動速度は 2000m/sec と高速駆動可能なことが分かる。

図 2 には、本研究のために手作り部品を集めて立ち上げた波長 1310nm の光通信光を使った磁性細線への光磁気記録系、記録磁区を観察するための偏光顕微鏡観察系システム、細線に電流を印加した際に波長 780nm の半導体赤色レーザーを用いて磁性細線上を移動する磁区を光磁気再生する再生系の構成図を示した。

図 3 には、高速で光パワーに限りがある光通信光パルスを使って、磁性細線上への光磁気記録ができるのか、その可能性を検討した媒体構成を示す。磁壁の高速駆動には図 3 左側に示すような磁性層/Pt の積層構造が必須要件となる。しかし、Pt は重金属であるため熱容量が大きく（しかし、抵抗率が大きいので熱伝導は良くない）、一見光磁気

記録には不利に思われる。ただし、Pt は大きなジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)を磁性層に及ぼすため Pt 側界面付近にある磁性層のスピンのねじれを生じさせる。このねじれは光磁気記録で使う上向き磁界と有意な角度をもつため記録トルクとして役立つことが期待できる。このように Pt ヘテロ界面構造の光磁気記録への利害を明らかにする必要がある。そこで、DMI が小さく、界面でスピンのねじれのない Cu を比較材料に選んで記録実験を行った。Cu の場合、熱伝導率は大きい熱容量は大きくはないので良い比較材料となる。この 2 種類の磁性細線を作成し、光磁気記録を比較した結果が図 4 である。図 4 の左側の図は、同じ光パワーを図 3 の媒体に照射した時の TbCo/Pt と TbCo/Cu に記録された記録磁区サイズに対する記録磁界依存性を示す。下地によって TbCo の保磁力は左右されるため、横軸は記録磁界を保磁力で規格化した。ここでは、光磁気記録実績が多く、記録磁区サイズのバリエーションも多い、記録状況を観察しやすい TbCo を採用した。図 4 左図を見るとわかるように、TbCo/Pt のほうが TbCo/Cu に比べて記録磁界が半減しており、Pt とのヘテロ界面が光磁気記録に有利に働いていることが分かる。さて、記録感度を高める基板材料の検討も重要である。そこで、基板には熱伝導率が大きく異なるプラスチック、ガラス、SiO₂つきシリコン基板の 3 種類で同じ光パワーで光磁気記録の比較を行った。この図を見てわかるように、印加できる記録磁界範囲内で記録磁区を形成できたのは最も熱伝導率が低いプラスチック基板だけであった。この結果は GdFeCo/Pt にも適応可能と考える。

次に、GdFe/Pt 磁性細線を作り、GdFe 記録膜の記録磁区をパルス電流で高速駆動した時に、波長 780nm の再生光で光磁気信号を得ることができるのか検討した。その結果、図 5 に示すように高速移動磁区をリアルタイムで波形観察することに成功した。磁性細線に印加した記録パルス幅は 10nsec、再生信号の半値幅も約 10nmsec であった。

磁性細線への記録磁区サイズと磁壁移動速度とデータ転送レートとの関係を図 6 に示した。本検討での磁区の移動速度は 2000m/sec だったので図中に点線で示した。最短記録磁区長を 100nm としたとき、データ転送速度は 20Gbps となる。光磁気記録では最短記録磁区長は 40nm くらいだったので 100nm は狙える長さであり、5G 規格のデータ転送速度に相当する。現在、100Gbps の光通信データは 4 並列で処理しており、各系列のデータレートは 25Gbps である。一般的な信号処理系半導体の駆動スピードは 25Gbps なので、本提案で狙える範囲である。当研究室でのこれまでの最高磁壁移動速度は 5200m/sec だったので、5000m/sec のところにも点線で示したが、この速度であれば、25Gbps を実現するには最短磁区長をもっと長くできる。磁壁移動速度の向上と最短記録磁区長の関係を明らかにするのが今後の課題である。

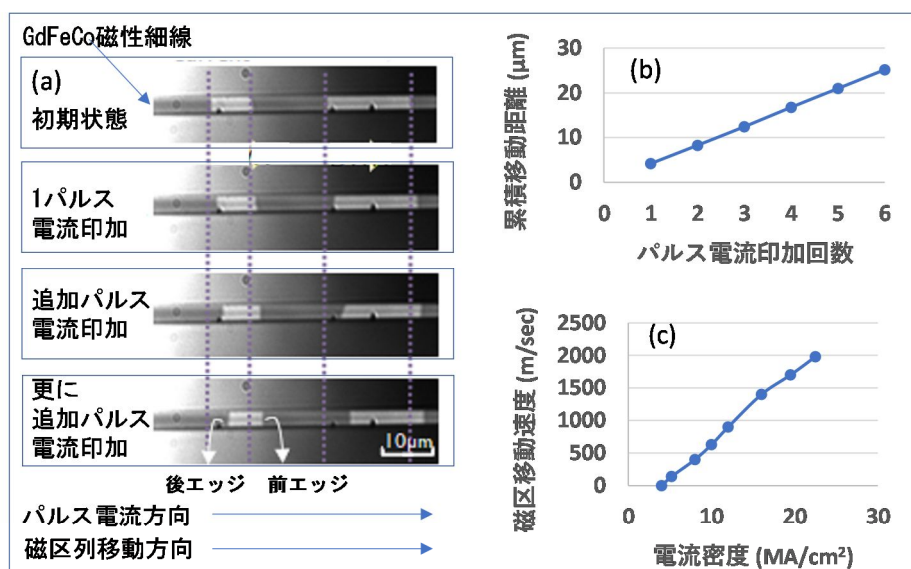


図 1 (a) GdFeCo磁性細線の初期状態に複数磁区を記録し、細線に電流を1パルス印加した時、磁区列は一斉に右に動く。追加パルスでさらに右に動く。(b) このときの磁壁の累積移動距離の印加パルス回数依存性 (c) このときの磁区移動速度の電流密度依存性。電流密度に比例して磁壁の移動速度は増大する。

Pico pulse recording with the InPlane/ polar domain scope BH-68781IP(NeoArk)

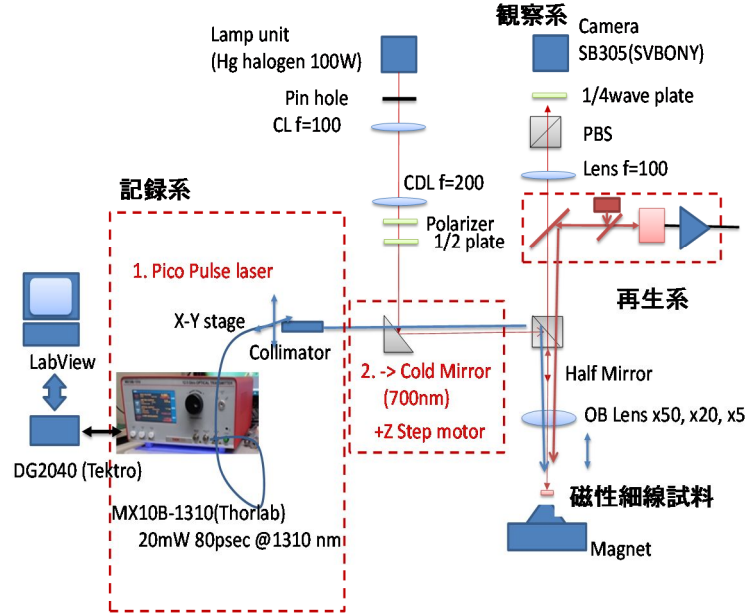


図2 電流駆動型GdFeCo磁性細線の記録再生のために手作りした記録再生装置。光通信光記録を目的としているため波長1310nmのパルスレーザーを用いた。最短パルス幅は40psecなので、データレート25Gbpsの検討が狙える。試料は偏光顕微鏡の観察ステージに置き、記録状況を偏光顕微鏡イメージでとらえることができる。右側には波長780nmのレーザーによる光磁気再生系を準備した。これにより、電流駆動中の記録磁区列をリアルタイムで再生することができる。

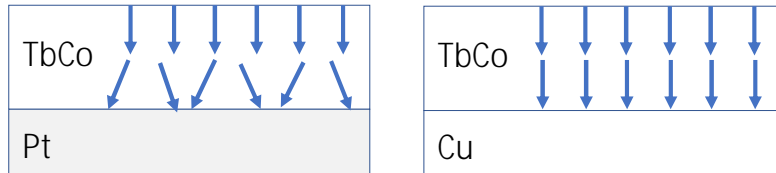


図3 微弱な光ファイバーの光パルスで磁性細線に光磁気記録する必要がある。そこで、記録感度向上にヘテロ界面構造が及ぼす影響を調べるため、左図に示すように大きなジャロシンスキー守谷相互作用(DMI)とスピホール効果(SHE)をもたらす重金属Pt層とTbCo層のヘテロ構造への光磁気記録を検討する。この場合、Pt層界面のTbCo層のスピンはDMIの影響で互いに直交するように曲がるため、上向き記録磁界により磁化反転しやすくなると期待される。一方、右に示すようにTbCo/Cuの場合には、DMIが小さいのでTbCo層への影響は少なく、記録アシスト効果は小さいと考えられる。

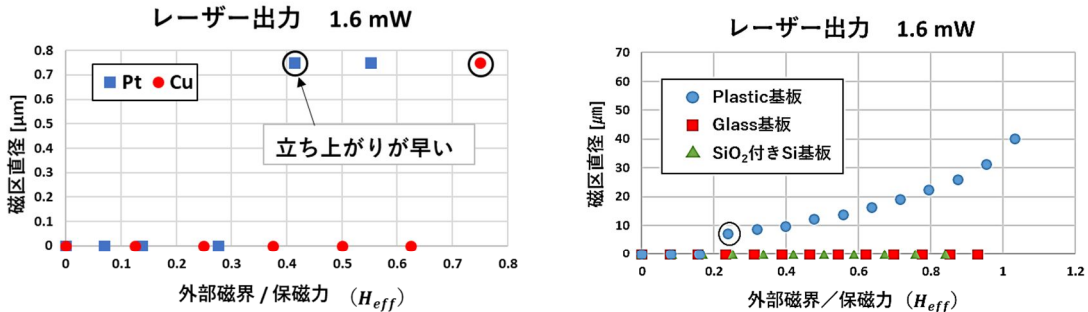


図4 (a) 図3で説明した光磁気記録感度向上策を検証した結果を示す。ヘテロ界面がPtの場合、Cuに比べて半分の記録磁界で記録ができた。(b) 光磁気記録における使用する基板に対する記録磁界依存性。熱蓄積効果の大きなプラスチック基板の場合少ない磁界でも記録できるが、ガラスやシリコン基板の場合には印加可能な記録磁界範囲では記録ができなかった。

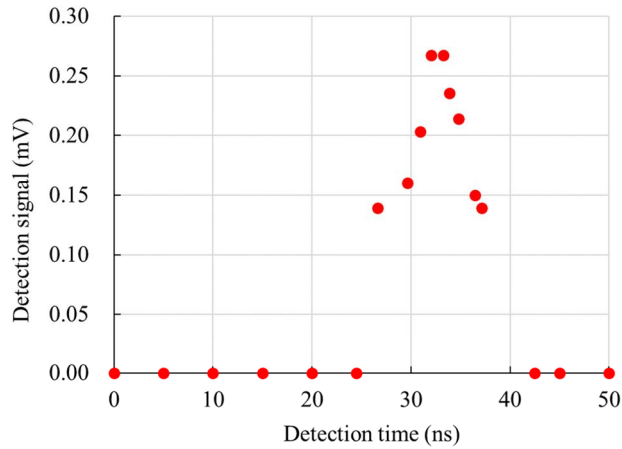


図5 波長780nmの光スポットをGdFeCo磁性細線上に記録した磁区の左側に集光照射した状態で、細線左側からパルス電流を10nsec印加する。このとき高速で記録磁区は右側に移動し、この光スポットを高速通過する。このとき検出したリアルタイム光磁気(MO)信号の再生波形を示した。従来の光磁気記録では、磁区の移動速度は最高で50m/sec程度だったが、今回はその10倍高速で半値幅約10nsecのMO信号を獲得することができた。

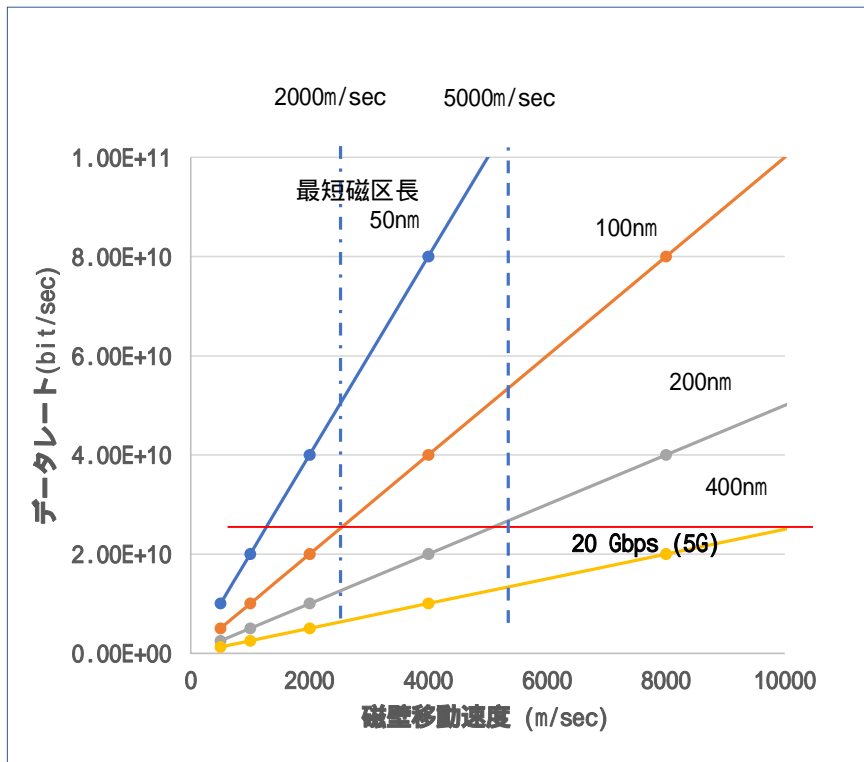


図6 様々な最短磁区長(50nm~400nm)における電流による磁壁移動速度とデータレートの関係。速度2000m/secで最短磁区長が100nmであれば、データレートは20Gbpsとなることわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 1) S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 11
2. 論文標題 Ultra-thin interfacial domain wall less than 1 nm based on TbxCo100-x/Cu/[Co/Pt] ₂ heterostructures for multi-level magnetic pillar memory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0072336	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, and H. Awano	4. 巻 7
2. 論文標題 Large Perpendicular Exchange Energy in TbxCo100-x/Cu (t)/[Co/Pt] ₂ heterostructures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Magnetochemistry	6. 最初と最後の頁 110141
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/magnetochemistry7110141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鷲見聡、Armet Yagmur, 田辺賢士、粟野博之
2. 発表標題 TbCo/重金属ヘテロ界面のホール効果
3. 学会等名 第60回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Oikawa, S. Sumi, K. Tanabe, H. Awano,
2. 発表標題 Spin motive force due to domain wall motion in GdFeCo magnetic wires
3. 学会等名 2022 Joint MMM-INTERMAG（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kambe, S. Ranjbar, S. Sumi, K. Tanabe, H. Awano
2. 発表標題 Influence of pulse width and Joule heating on current-induced domain wall motion
3. 学会等名 2022 Joint MMM-INTERMAG (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------