

令和元年6月21日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06328

研究課題名（和文）量子ドットデバイスを用いた熱アシスト磁気記録用ナノ光ヘッドの研究

研究課題名（英文）Research on nano-optical head using a quantum dot device for heat-assisted magnetic recording

研究代表者

片山 龍一（KATAYAMA, Ryuichi）

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：30610521

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：ハードディスク装置の記録密度向上に不可欠な熱アシスト磁気記録には熱源となる近接場光を発生するナノ光ヘッドが必要であるが、光の利用効率が低いことが課題である。本研究の目的は、量子ドットを含むリングレーザーとナノ光アンテナから成る新規な構成により光の利用効率を大幅に高めたナノ光ヘッドを実証することである。本研究では、提案するナノ光ヘッドについて電磁界解析のシミュレーションを行い、高い近接場光の強度を得るための最適な構成に関する設計指針を得た。また、リングレーザーの発振とその光がナノ光アンテナ先端へ到達することを確認し、ナノ光ヘッドの基本機能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はナノフォトニクス/プラズモニクス、マグネティクス、ナノ材料/ナノ加工という複数の分野に跨る独創的なものである。本研究により、ハードディスク装置の台数を増やすことなく大量のデータの蓄積が可能となり、環境・エネルギー問題の解決および豊かな情報文化社会の実現に寄与することができる。また、このような量子ドットデバイスによる光制御技術は、光を任意の微小領域へ集中させ得ること、超高速な光のスイッチングが可能なることから、高感度バイオセンサー、超高速光論理回路等へも転用可能な技術である。

研究成果の概要（英文）：In heat-assisted magnetic recording, which is indispensable for increasing the recording density of hard disk drives, a nano-optical head to generate a near-field light as a heat source is necessary, but there is a problem that the light utilization efficiency is low. The objective of this research is to demonstrate a nano-optical head in which the light utilization efficiency is significantly improved with a novel structure, which consists of a ring laser containing quantum dots and a nano-optical antenna. In this research, a simulation of electromagnetic field analysis for the proposed nano-optical head was conducted, and design guidelines regarding the optimum structure for obtaining high near-field light intensity were obtained. Moreover, the oscillation of the ring laser and the delivery of the light to the tip of the nano-optical antenna were confirmed, and the basic function of the nano-optical head was demonstrated.

研究分野：応用光学・量子光工学

キーワード：熱アシスト磁気記録 量子ドット 近接場光

## 1. 研究開始当初の背景

情報爆発の時代を迎え、全世界で創出されるデータ量は2025年に40ZB（1ZB=10<sup>21</sup>B）に達するとの予測がある。このため、記録装置の主役であるハードディスク装置に対しても、記録密度向上の要求は高まる一方である。ハードディスク装置の記録密度は現在816Gb/in<sup>2</sup>に達している。さらなる記録密度の向上には記録媒体を構成する磁性粒子の粒径を小さくする必要があるが、それに伴って熱揺らぎが増大し記録状態が不安定になる。これを防ぐには媒体の保磁力を高める必要があるが、記録ヘッドで発生できる磁界には限界があり、現行方式ではそのような高保磁力媒体への記録は困難である。そこで、記録時にのみ媒体へ光を照射して媒体を加熱し、媒体の保磁力を低くする熱アシスト磁気記録方式が注目されている。

熱アシスト磁気記録においては、光スポットの大きさを記録マークの大きさと同程度に小さくする必要がある。例えば、1Tb/in<sup>2</sup>の記録密度を実現するために必要な光スポットの大きさは25nm程度となる。このような回折限界以下の微小光スポットの実現には近接場光の利用が必須であり、そのためのナノ光ヘッドとして、例えばSeagate社からLollipop型、HGST社からE-antenna型の構成がそれぞれ提案されている。

しかし、従来のナノ光ヘッドには、導波路を介して光をナノ光アンテナへ導入するため、光の利用効率が数%と極めて低いという課題がある。このとき、ナノ光アンテナで有効に利用されなかった光は熱となってナノ光アンテナの温度を上昇させ、ナノ光アンテナ自身を溶かしてしまふ。記録密度向上のためにナノ光アンテナの大きさをさらに小さくすると、光の利用効率はさらに低くなる。このため、従来のナノ光ヘッドによる記録密度の限界は数Tb/in<sup>2</sup>であり、10Tb/in<sup>2</sup>を超える記録密度を実現するには、導波路を用いない全く新しい構成のナノ光ヘッドが必要になる。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、提案する熱アシスト磁気記録用ナノ光ヘッドを搭載した超高密度ハードディスク装置を実用化し、省エネルギー化や豊かな情報文化社会の実現に寄与することである。熱アシスト磁気記録はハードディスク装置の記録密度向上に不可欠な技術である。上に述べたように、熱アシスト磁気記録には熱源となる近接場光を発生するナノ光ヘッドが必要であるが、光の利用効率が低いことが課題である。本研究の研究期間内の目的は、量子ドットを用いた新規な構成により光の利用効率を飛躍的に高めたナノ光ヘッドを実証することである。理論解析により本方式の優位性を明確化すると共に最適な構成を導出し、実際にナノ光ヘッドを製作・評価してその有効性を示す。

## 3. 研究の方法

解析に関しては、まず電磁界解析ソフトウェアおよびワークステーションを導入して研究環境を整備した。次に、新規な構成のナノ光ヘッドについて、その構成の最適化を目的として電磁界解析のシミュレーションを行った。図1に検討したナノ光ヘッドの構成を示す。半導体基板上に量子ドットを含む発光層を有するリングレーザーを形成し、その横に金属のナノ光アンテナを設けるといったものである。このリングレーザーは電流により励起することで光源として動作する。光源から出射された光はナノ光アンテナへ導かれ、ナノ光アンテナ先端に近接場光を発生させる。従来のナノ光ヘッドにおいては光源とナノ光アンテナが離れているのに対し、図1に示す構成のナノ光ヘッドにおいては光源とナノ光アンテナが一体化している。このため、光源とナノ光アンテナの間で光の損失がなく、光の利用効率を大幅に高めることができる。さらに、このナノ光ヘッドは通常の半導体プロセスのみで製作可能なため、記録用の磁気ヘッドの製造工程との親和性が高く量産に適している。この構成について、リングレーザーの固有モード、ナノ光アンテナの長さ、リングレーザーとナノ光アンテナの間隔等をパラメーターとしてナノ光アンテナ先端における近接場光強度を計算した。

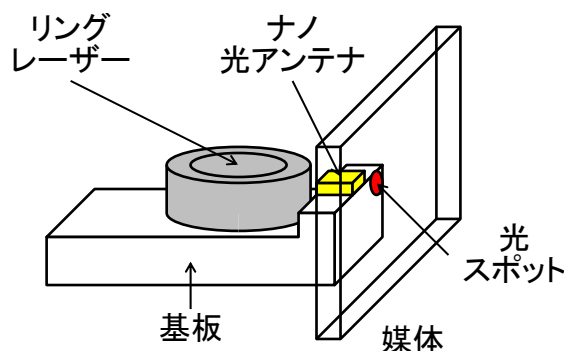


図1 検討したナノ光ヘッドの構成

一方、実験に関しては、まず量子ドットを含むリングレーザーを製作してレーザー発振状況を評価した。次に、ナノ光アンテナを製作してリングレーザーからの光のナノ光アンテナ先端への到達状況を評価した。なお、ナノ光ヘッドの製作・評価は、必要に応じて研究協力者である情報通信研究機構、(株)イノバステラ、および米国のカーネギーメロン大学からの支援を受けて行った。

#### 4. 研究成果

まず解析の結果について述べる。リングレーザーの材質はガリウム砒素（屈折率 3.5）、ナノ光アンテナの材質は金（屈折率  $0.28+7.2i$ ）とした。リングレーザーの内径、外径はそれぞれ 300nm、400nm、ナノ光アンテナの幅は 50nm、ナノ光アンテナの長さは 50nm~200nm、リングレーザーとナノ光アンテナの間隔は 0nm~50nm、リングレーザーの発振波長は 1050nm とした。実際のナノ光ヘッドの構造は 3 次元であるが、計算には簡単のため厚さ方向の構造が一様であると仮定した 2 次元有限要素法を用いた。

リングレーザーとナノ光アンテナの間隔が 0nm の場合、ナノ光ヘッドは 3 つのモード（モード 1~3 と呼ぶ）を有することがわかった。図 2 に、ナノ光アンテナの長さが 100nm の場合の、モード 1~3 に対する面内の近接場光強度分布の計算結果を示す。(a)~(c) はナノ光ヘッドの全体図、(d)~(f) はナノ光アンテナ部分の拡大図である。モード 2 においてはナノ光アンテナ先端に一定量の近接場光が観測されたが、モード 1、3 においてはナノ光アンテナ先端に近接場光が殆んど観測されなかった。

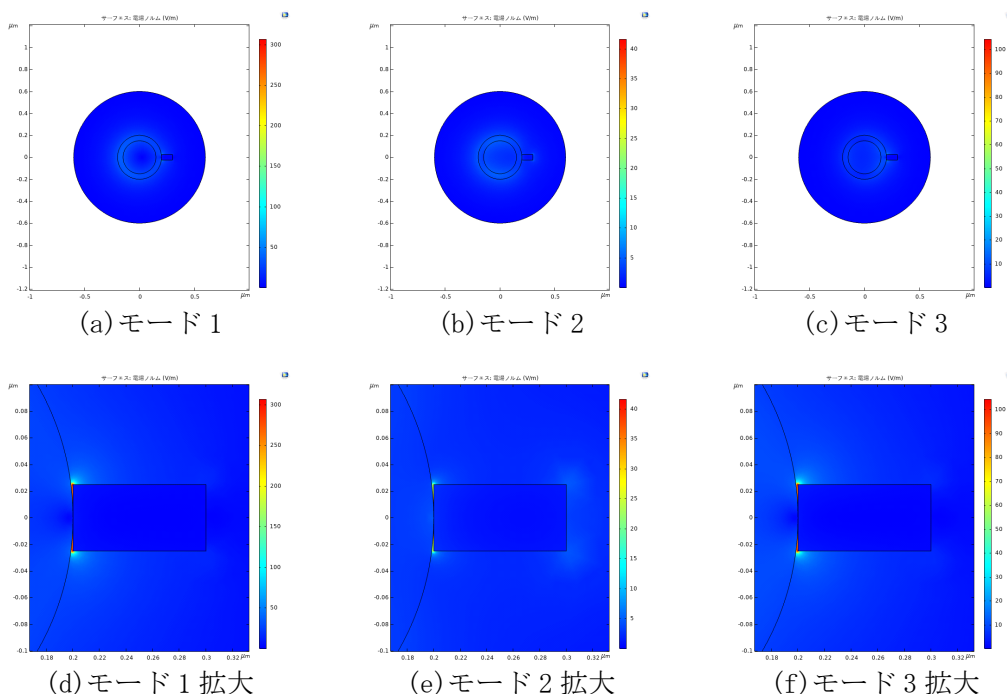


図 2 近接場光強度分布の計算結果

図 3 に、ナノ光アンテナの長さを 50nm から 200nm まで変化させた場合の、ナノ光アンテナ先端における近接場光強度の計算結果を示す。モード 1~3 のいずれにおいても、ナノ光アンテナ長さが長くなるに従って近接場光強度は減少した。これはナノ光アンテナの材料である金による吸収が原因であると考えられる。

リングレーザーとナノ光アンテナの間隔が 0nm でない場合、ナノ光ヘッドは 4 つのモード（モード 1~4 と呼ぶ）を有することがわかった。図 4 に、ナノ光アンテナの長さを 100nm とし、リングレーザーとナノ光アンテナの間隔を 10nm から 50nm まで変化させた場合の、ナノ光アンテナ先端における近接場光強度の計算結果を示す。モード 2 においては、リングレーザー-ナノ光アンテナ間隔が広くなるに従って近接場光強度は増加した。その他のモードにおいては、リングレーザー-ナノ光アンテナ間隔と近接場光強度の間に明確な相関は見られなかった。リングレーザーとナノ光アンテナの間隔が 30nm 以上の場合、モード 2 における近接場光強度はその他のモードにおける近接場光強度より高かった。

以上により、ナノ光アンテナ先端において高い近接場光強度を得るには、如何にしてモード 2 を選択的に励起するかが重要であることがわかった。また、ナノ光アンテナ長さや近接場光強度の関係、リングレーザー-ナノ光アンテナ間隔と近接場光強度の関係を明らかにすることにより、高い近接場光強度を得るためのナノ光ヘッドの最適な構成に関する設計指針を得ることができた。

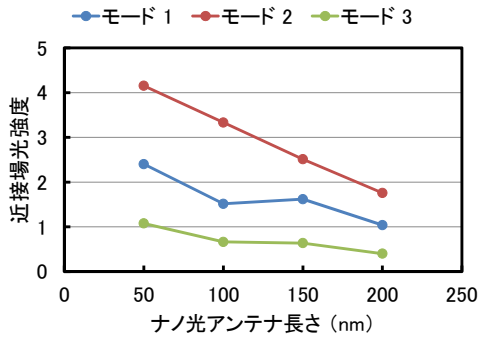


図3 ナノ光アンテナ長さとの近接場光強度の関係

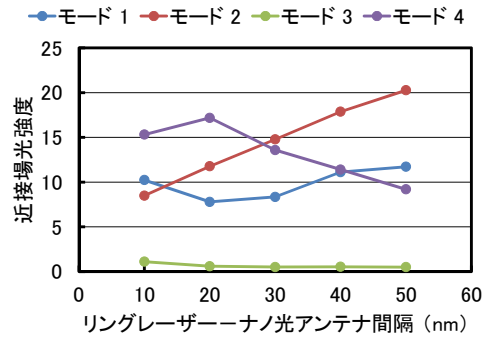


図4 リングレーザー-ナノ光アンテナ間隔との近接場光強度の関係

次に実験の結果について述べる。量子ドットを含むリングレーザーを製作・評価した結果、レーザー発振することを確認した。図5に製作したリングレーザーの外観、図6に電流と光出力の関係の測定結果、図7に光スペクトルの測定結果を示す。レーザー発振に特有のしきい値特性や単峰の光スペクトルが確認された。また、ナノ光アンテナを製作・評価した結果、リングレーザーからの光がナノ光アンテナ先端へ到達することを確認した。以上によりナノ光ヘッドの基本機能を実証することができた。

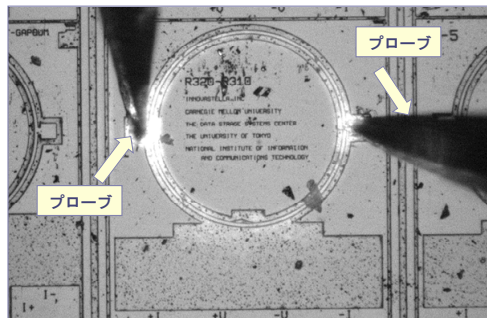


図5 リングレーザーの外観

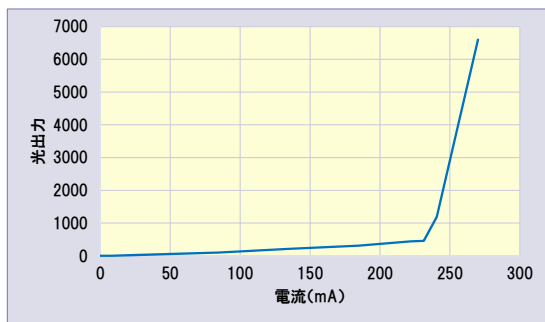


図6 電流と光出力の関係の測定結果

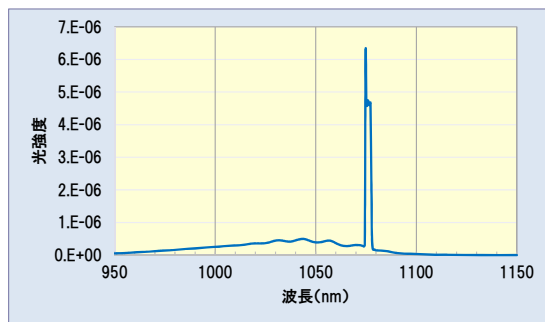


図7 光スペクトルの測定結果

本研究で得られた成果は、最終目的である超高密度ハードディスク装置の実用化に向けた最初のマイルストーンへ到達したことを示すものであり、国内外のハードディスク業界への有効なアピール材料になると考えている。今後の課題としては、解析に関しては3次元有限要素法を用いたより現実的な計算とそれによるナノ光ヘッドの構成の最適化、実験に関しては実際の記録媒体を用いた熱アシスト磁気記録の実証が挙げられる。

なお、本研究の開始当初に検討したナノ光ヘッドの構成は図1に示すものではなく、半導体基板上に量子ドットを含む発光層を有するメサを形成し、その上に金属のナノ光アンテナを設けるというものであった。このメサは光により励起することで光源として動作する。検討の過程において、この構成のナノ光ヘッドは図1に示す構成のナノ光ヘッドに比べ、光源とナノ光アンテナの間で光の損失がなく光の利用効率を大幅に高めることができる点では同じであるが、記録用の磁気ヘッドの製造工程との親和性の点では積層方向が異なるためやや不利であると判断した。このため、本研究の途中で検討対象とするナノ光ヘッドの構成を図1に示すものへ変更したことを付記しておく。

<引用文献>

- ① M. H. Kryder et al., “Heat Assisted Magnetic Recording”, Proc. IEEE, Vol. 96, No. 11, pp. 1810-1835 (2008).
- ② W. A. Challener et al., “Heat-Assisted Magnetic Recording by a Near-Field Transducer with Efficient Optical Energy Transfer”, Nat. Photonics, Vol. 3, No. 4, pp. 220-224 (2009).
- ③ B. C. Stipe et al., “Magnetic Recording at  $1.5 \text{ Pb m}^{-2}$  Using an Integrated Plasmonic Antenna”, Nat. Photonics, Vol. 4, No. 7, pp. 484-488 (2010).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura, “Simulation on Near-Field Light Generated by Semiconductor Ring Resonator with Metal Nano-Antenna for Heat-Assisted Magnetic Recording”, accepted for publication in Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 58 (2019). (査読あり)

[学会発表] (計3件)

- ① Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura, “Simulation on Near-Field Light Generated by Semiconductor Ring Resonator with Metal Nano-Antenna for Heat-Assisted Magnetic Recording”, SPIE Optics + Photonics 2019 (2019).
- ② Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura, “Investigation of the Shape of Metal Nano-Antenna Attached to Semiconductor Ring Resonator for Heat-Assisted Magnetic Recording”, International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication 2018 (2018).
- ③ Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura, “Simulation on Eigenmodes of Semiconductor Ring Resonator with Metal Nano-Antenna for HAMR Heat Source”, International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (2018).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：杉浦 聡

ローマ字氏名：(SUGIURA, Satoshi)

※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、研究者個人に帰属されます。