

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04541

研究課題名（和文）超高密度熱アシスト磁気記録用高効率・小型ナノ光ヘッドの研究

研究課題名（英文）Research on high-efficiency and small-size nano-optical head for ultra-high density 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） 3,300,000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、光の利用効率が低くサイズが大きいことが課題である。本研究の目的は、光源を内蔵した新規な構成により、従来に比べて遥かに光の利用効率が高くサイズが小さい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、各種デバイスパラメーターを最適化すると共に、高い近接場光の強度を得るための各種構造を提案し有効性を示した。また、提案するナノ光ヘッドの試作・評価を行い、従来のナノ光ヘッドに比べて効率を大幅に向上可能な見通しを示した。

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り、その学術的な意義は大きい。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持続可能で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、提案するナノ光ヘッドは光源とナノ光アンテナが一体化していることを特徴とするが、このような光源とナノ光アンテナ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 and that the size is large. The objective of this research is to demonstrate a nano-optical head with a novel structure containing a light source, whose light utilization efficiency is significantly high and whose size is significantly small compared with conventional ones. In this research, by conducting a simulation of electromagnetic field analysis for the proposed nano-optical head, various device parameters were optimized and various structures for obtaining high near-field light intensity were proposed and their validity was confirmed. Moreover, by fabricating and testing the proposed nano-optical head, the prospect of significantly improving the efficiency compared with conventional nano-optical heads was confirmed.

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 近接場光 リング共振器 ナノ光アンテナ

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=10²¹B) 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/inch² に達しているが、さらなる記録密度の向上には「トリレンマ」を解決する必要がある。信号対雑音比を確保するには記録媒体の磁性粒子の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、記録用の磁気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、熱源となる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、10Tb/inch² 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 8nm 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、光導波路や自由空間を介して光源からナノ光アンテナへ光を導入するため、光の利用効率が極めて低く、かつサイズが極めて大き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う。このため、従来のナノ光ヘッドを搭載したハードディスク装置は未だ実用化に至っておらず、記録密度の限界も数 Tb/inch² であると考えられている。この課題を解決し、10Tb/inch² を超える記録密度を実現するためには、全く新しい構成のナノ光ヘッドが必要不可欠である。

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することにより、情報爆発の時代の要請に応えることである。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持続可能で豊かな情報文化社会の実現に寄与することができる。本研究の研究期間内の目的は、光源を内蔵した新規な構成により、従来に比べて遥かに光の利用効率が高くサイズが小さいナノ光ヘッドを実証することである。具体的には、理論解析により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

図 1 に提案するナノ光ヘッドの構成を示す。半導体リング共振器は発光媒質である量子ドットを含んでおり、電流注入により励起することでレーザー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、ナノ光アンテナの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、提案するナノ光ヘッドは光源とナノ光アンテナが一体化していることを特徴とする。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と共に、サイズを大幅に小さくすることができる。さらに、提案する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。

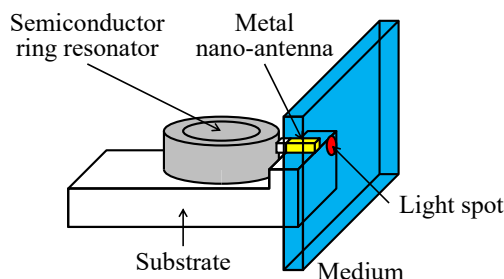


図 1 提案するナノ光ヘッドの構成

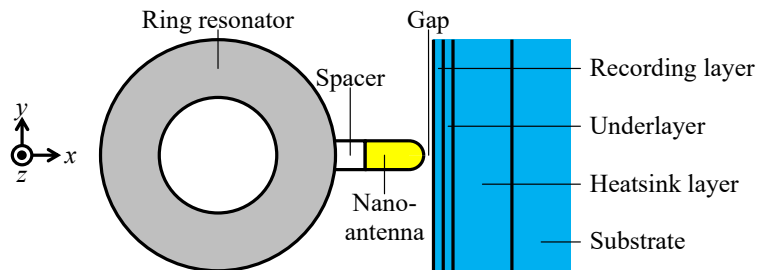
理論解析に関しては、3次元有限要素法を用いた電磁界解析のシミュレーションを行い、ナノ光ヘッドの各種デバイスパラメーターを最適化すると共に、高性能化に向けた複数の新規な構造を提案した。一方、実験に関しては、実際のナノ光ヘッドの試作・評価を通して性能改善

を進めた。なお、ナノ光ヘッドの試作・評価は、必要に応じて研究協力者である（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。

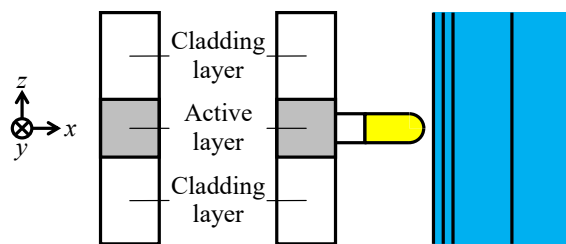
4. 研究成果

(1)理論解析

まず、図2に示すシミュレーションモデルを構築し、記録媒体を含むシミュレーションを行った。リング共振器の側面にスペーサーを介してナノ光アンテナが設けられている。リング共振器は量子ドットを含む活性層とそれを挟む2つのクラッド層により構成される。記録媒体は記録層、下地層、ヒートシンク層、基板により構成される。活性層、クラッド層の材料はそれぞれ GaAs、AlGaAs とし、ナノ光アンテナの材料は Au とした。リング共振器の内径、外径はそれぞれ 1000nm、2000nm、活性層の厚さは 200nm とし、ナノ光アンテナの直径は 50nm、長さは 100nm とした。量子ドットは波長 1050nm 付近にゲインを有するものとした。



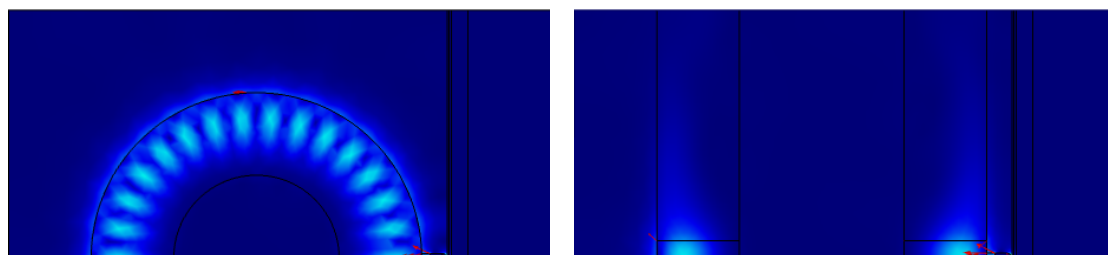
(a) 平面図



(b) 側面図

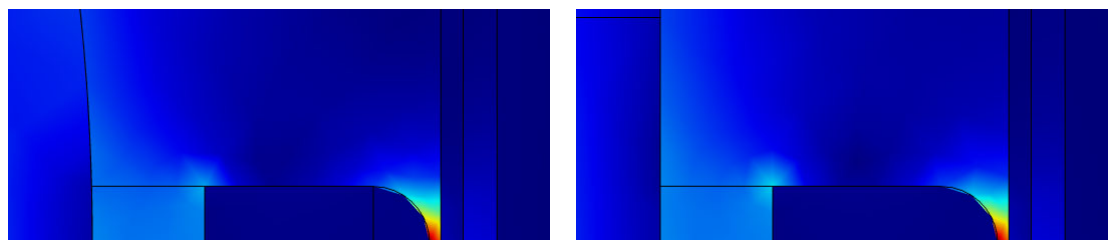
図2 シミュレーションモデル

図3に、波長 1041nm のモードに対する電場強度分布の計算結果を示す。ナノ光アンテナの先端と記録媒体の表面の間に近接場光が観測された。図4に、記録媒体の表面における電場強度分布の計算結果を示す。電場強度分布の2乗である光強度分布の半値全幅は y 方向、z 方向とも約 25nm であった。これは記録密度 1Tb/inch² に相当する。



(a) x-y 断面 ($y > 0$)

(b) x-z 断面 ($z > 0$)



(c) ナノ光アンテナ付近の(a)の拡大図

(d) ナノ光アンテナ付近の(b)の拡大図

図3 電場強度分布の計算結果

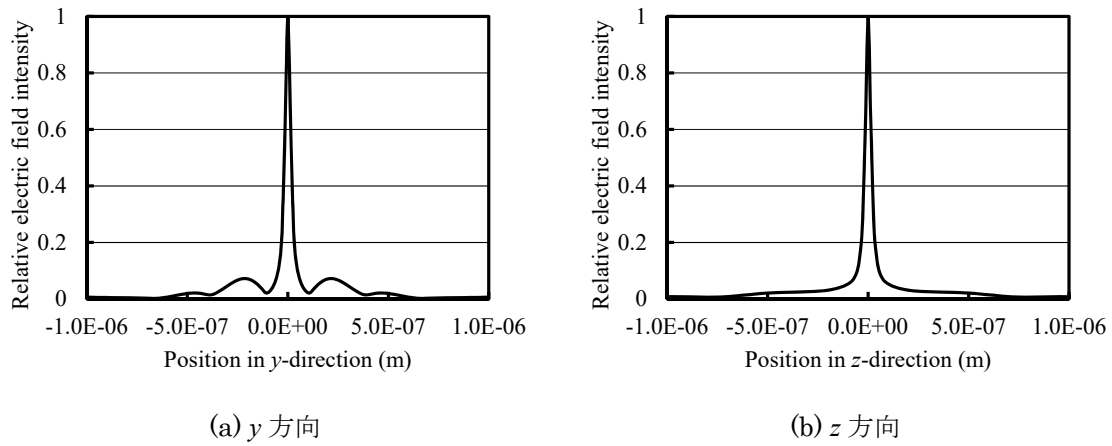


図 4 記録媒体の表面における電場強度分布の計算結果

次に、リング共振器、ナノ光アンテナの各種デバイスパラメーターの最適化について検討した。リング共振器に求められる性能は、 Q 値が高いこととナノ光アンテナとの光結合効率が高いことである。また、リング共振器には各種のモード（半径方向のモード、円周方向のモード、TE/TM モード、偶/奇モード）があり、レーザー発振の安定化、ナノ光アンテナとの光結合のためには、所望のモードを選択的に励起する必要がある。特に、TE/TM モードに関しては TE モードのみ、偶/奇モードに関しては偶モードのみがナノ光アンテナと光結合する。リングの幅とサイズをパラメーターとして検討した結果、リングの幅が広いほど Q 値は高くなるが光結合効率は低くなり、半径方向のモードの選択性は弱まること、リングのサイズが大きいほど Q 値は高くなるが光結合効率は低くなり、円周方向のモードの選択性は弱まることがわかった。

一方、ナノ光アンテナに求められる性能は、近接場光の光スポットのサイズが小さいことと近接場光の強度が高いことである。先端の曲率半径、長さ、側面のテーパ角度をパラメーターとして検討した結果、先端の曲率半径が小さいほど近接場光の光スポットのサイズは小さくなること、長さや側面のテーパ角度には近接場光の強度が極大となる最適値が存在することがわかった。また、この結果はプラズモン共鳴条件に基づき説明できることがわかった。

次に、リング共振器、ナノ光アンテナの高性能化に向けた新規な構造について検討した。リング共振器に関しては、図 5 に示す 3 種類の構造を提案した。(a)の非軸対称型は、 Q 値の低下を抑制しつつ光結合効率を高める効果があることがわかった。(b)のスリット内蔵型は、所望のモードに合わせてスリットの位置を適切に設計することにより、上記の 4 種類のモード全ての選択性を高める効果があることがわかった。(c)の二重共振器型は、所望のモードに合わせて 2 つの共振器のサイズを適切に設計することにより、偶/奇モードを除く 3 種類のモードの選択性を高める効果があることがわかった。

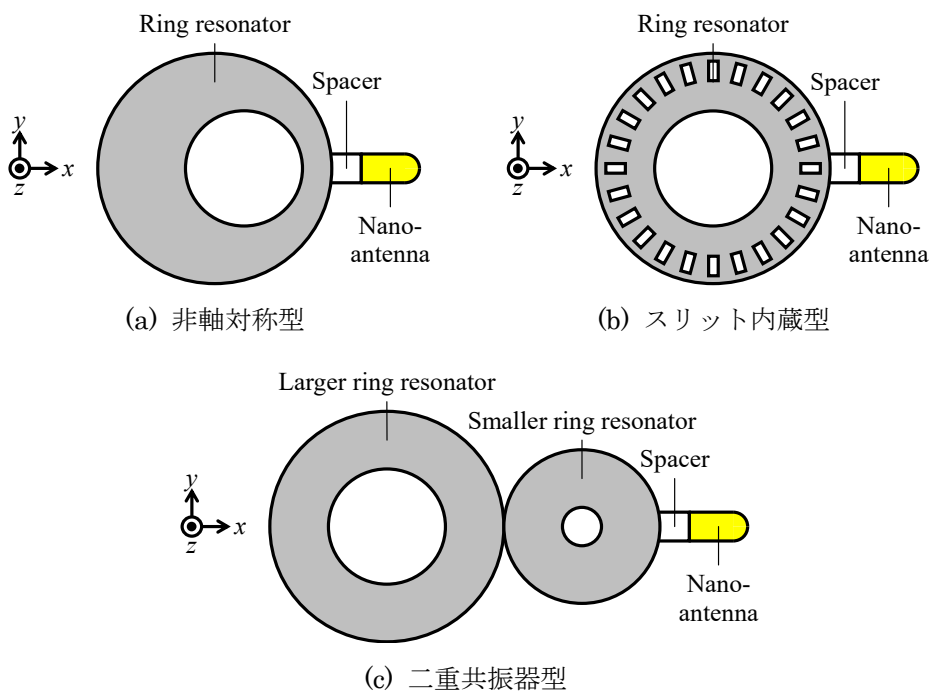


図 5 リング共振器の新規な構造

一方、ナノ光アンテナに関しては、図6に示すような、金属のシェルに誘電体のコアを埋め込んだ金属-誘電体ハイブリッド型の構造を提案した。この構造は、近接場光の光スポットのサイズを縮小すると共に、近接場光の強度を高める効果があることがわかった。また、この結果はプラズモン共鳴条件に基づき説明できることがわかった。

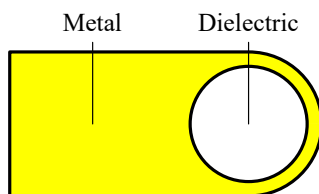


図6 ナノ光アンテナの新規な構造

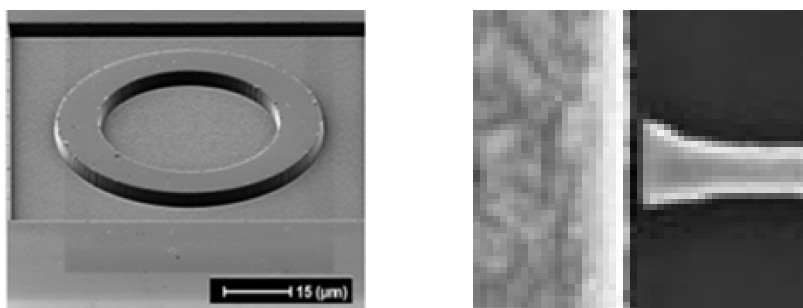
理論解析における今後の課題は、光エネルギーから熱エネルギーへの変換効率を求めるための熱に関するシミュレーション、電気エネルギーから光エネルギーへの変換効率を求めるための半導体に関するシミュレーション、および更なる高性能化のためのフォトニック結晶を用いたリング共振器、誘電体を用いたナノ光アンテナ等の新規な構造の検討である。

(2)実験

まず、提案するナノ光ヘッドのテストサンプルの製作・評価を行った。図7に製作したナノ光ヘッドの写真を示す。リング共振器への入力パワーに対するナノ光アンテナからの出力パワーの比である効率を測定した結果、構成の最適化により、従来提案されているナノ光ヘッドに比べて効率を大幅に高めることができる見通しを得た。

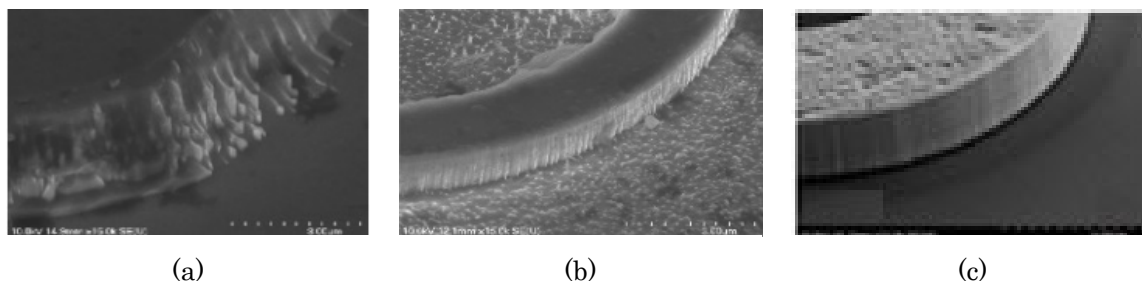
次に、効率を高めるため、リング共振器の側壁の平滑性の向上およびリング共振器とナノ光アンテナの間隔の縮小を目的としたデバイスの製作・評価に注力した。その結果、プロセスの改善により、リング共振器の側壁の平滑性は図8の(a)→(b)→(c)のように向上し、側壁で光が全反射される際に発生する光損失が大幅に低減された。さらに、リング共振器にナノ光アンテナを近接させることにより、当初のデバイスに比べて近接場光の強度が大幅に増加した。

実験における今後の課題はナノ光ヘッドの装置実証である。



(a) 全体図 (b) ナノ光アンテナ付近の(a)の拡大図

図7 製作したナノ光ヘッド



(a) (b) (c)

図8 リング共振器の側壁

<引用文献>

- ① M. H. Kryder et al., Proc. IEEE, Vol. 96, No. 11, pp. 1810-1835 (2008).
- ② W. A. Challener et al., Nat. Photonics, Vol. 3, No. 4, pp. 220-224 (2009).
- ③ B. C. Stipe et al., Nat. Photonics, Vol. 4, No. 7, pp. 484-488 (2010).
- ④ R. Katayama et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 58, No. SK, SKKB01 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryuichi Katayama, Jinghan Chen, and Satoshi Sugiura	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulation on double-ring-resonator-type device considering gain for heat-assisted magnetic recording	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-023-00805-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura	4. 巻 61
2. 論文標題 Simulation on a non-axisymmetric ring resonator with a nano-antenna for heat-assisted magnetic recording	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SK1006-1～9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac6054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura	4. 巻 29
2. 論文標題 Simulation on parameter optimization of gold nano-antenna attached to semiconductor ring resonator for heat-assisted magnetic recording device	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 127-139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-021-00713-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura	4. 巻 28
2. 論文標題 Simulation on parameter optimization of semiconductor ring resonator with nano-antenna for heat-assisted magnetic recording device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 681-692
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10043-021-00697-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura	4. 巻 27
2. 論文標題 Simulation on near-field light on recording medium generated by semiconductor ring resonator with metal nano-antenna for heat-assisted magnetic recording	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 432-440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-020-00612-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Ryuichi Katayama, Jinghan Chen, and Satoshi Sugiura
2. 発表標題 Simulation on Metal-Dielectric Hybrid Nano-Antenna Attached to Semiconductor Ring Resonator for Heat-Assisted Magnetic Recording
3. 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura
2. 発表標題 Simulation on Double-Ring-Resonator-Type Device Considering Gain for Heat-Assisted Magnetic Recording
3. 学会等名 The 13th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura
2. 発表標題 Simulation on Double Semiconductor Ring Resonators with Nano-Antenna for HAMR Device
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura
2 . 発表標題 Simulation on Non-Axisymmetric Ring Resonator with Nano-Antenna for Heat-Assisted Magnetic Recording
3 . 学会等名 The 26th Microoptics Conference (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Ryuichi Katayama, Jinghan Chen, and Satoshi Sugiura
2 . 発表標題 Investigation on How To Excite a Desired Eigenmode Selectively in the Ring-Resonator-Type Device for Heat-Assisted Magnetic Recording
3 . 学会等名 SPIE Optics + Photonics 2021 (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura
2 . 発表標題 Simulation of Near-Field Light for Cylinder and Cone Type Nano-Antennas in Ring-Resonator-Type Device for Heat-Assisted Magnetic Recording
3 . 学会等名 The 12th International Conference on Optics-Photonics Design and Fabrication (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Jinghan Chen, Ryuichi Katayama, and Satoshi Sugiura
2 . 発表標題 Simulation on Parameter Optimization of Semiconductor Ring Resonator with Nano-Antenna for HAMR Device
3 . 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryuichi Katayama and Satoshi Sugiura
2. 発表標題 Three-Dimensional Simulation of Semiconductor Ring Resonator with Metal Nano-Antenna for HAMR Heat Source
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究協力者	栗山 和巳 (Kuriyama Kazumi)		
研究協力者	杉浦 聡 (Sugiura Satoshi)		

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		
米国	Carnegie Mellon Univ.		