

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26286023

研究課題名(和文) ナノ領域における円偏光生成と計測および応用技術の研究開発

研究課題名(英文) Development of generation and measurement method for nano-sized circular polarized light

研究代表者

石橋 隆幸 (ISHIBASHI, TAKAYUKI)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20272635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ナノサイズの円偏光を生成するプローブ(ナノ円偏光プローブ)の開発を行った。ナノ領域において光の位相を制御し、電界強度を増幅させる構造としてV溝型アパーチャ構造を提案し、電磁界シミュレーションによる解析によって、電場強度が増強された直径10 nmの円偏光を生成できることを明らかにした。そして、近接場光学顕微鏡で使用可能なV溝型アパーチャ構造を組み込んだプローブの設計を行い、Au被覆したSiN製プローブとV型溝アパーチャアンテナ構造を組み合わせたナノ円偏光プローブの作製に成功した。

研究成果の概要(英文)：Nano circular polarized light probes that produce circularly polarized light with nano-size were developed. Electro-magnetic simulation revealed that the nano-sized circularly polarized light can be generated using V-shaped aperture structure that can control the phase of light and enhance the electric field in nano-scale. Finally, we succeeded to fabricate a nano circular polarized light probe combining Au-coated SiN tip with the V-shaped aperture structure.

研究分野：磁気工学

キーワード：近接場光 円偏光

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光の波長より十分小さな物体に光を照射するとその表面から物体の直径程度の距離に伝搬しない近接場光が生じる。この近接場光の広がり、光の波長とは関係なく物体の直径程度である。また、この近接場光は共鳴条件を満たす場合(プラズモン共鳴)には、その電場強度は入射光の電場に比べて数桁もの増強が起こる。近年、この性質を利用した計測技術や応用の研究が盛んに行われている。例えば、10nm以下の空間分解能を実現した走査型近接場光学顕微鏡やチップエンハンスドラマンスペクトロスコピーの他、金属ナノ粒子を利用した生体計測技術、プラズモン共鳴を利用した超高密度光集積回路などである。これらの研究は、光の回折限界を超えた光制御技術という観点からも今後ますます重要になってくる。一方、円偏光を用いた計測技術である円二色性および磁気円二色性などの測定は、キラル物質や磁性体の物性研究や応用に用いられてきた重要な技術であるが、それらに加えて、最近では磁性研究の分野において逆ファラデー効果や熱磁気効果と呼ばれる超短パルス光による磁化反転やスピン波の生成(T. Sato et al., *Nature Photonics* 6 (2012) 662, T.A. Ostler, *Nature Comm.* 3 (2012) 666)といった、これまでの常識を覆すような実験の報告がなされ、ピコ秒レベルでの超高速なスピンの操作が現実味を帯びてきた。このような状況から容易に想像できるように、ナノ領域の円偏光技術の開発は、ナノサイズの磁性体、金属、半導体、有機分子、生体分子など広範囲の材料についての物性研究の計測だけでなく新機能性の創出につながることを期待できる。

近接場領域での円偏光の利用については、これまでに光ファイバプローブを利用した近接場磁気光学顕微鏡(MO-SNOM)において実現されている。この技術は、1995年に Betzig らによって初めて実現された(E. Betzig et al., *APL* 61 (1992) 142)。その後、我々は光ファイバプローブに円偏光変調法を適用することにより、120 nm程度の空間分解能を有する高分解能の磁気光学像を得ることに成功した(吉田武一心、石橋隆幸他、*日本応用磁気学会誌* 23 (1999) 1960)。しかしながら、金属被覆の光ファイバプローブでは、その空間分解能がプローブ先端に設けた開口の直径の100 nm程度に制限されてしまうことと、反射モードでの測定が困難であるという致命的な問題があった。それらの問題を解決するための技術として開口を持たない散乱型無開口プローブが期待されている。無開口プローブを使った偏光に関連した計測については、これまでに、ラマン散乱やプラズモンアンテナ周辺の電場分布の解析などに利用されている。

これまでに我々は、最近、10 nmの空間分解能を有する磁気光学イメージングを目

的とした散乱型無開口プローブを用いたMO-SNOMの研究開発を行い、10 nmレベルの高空間分解能と優れた偏光特性を両立した偏光イメージ計測に成功している(M. Aoyaghi, T. Ishibashi et al., *IEEE Trans. Ma062gn.* 48 (2012) 3670)。さらに、これらの結果は我々が行った電磁界シミュレーションの結果ともよく一致した(Y. Cai, T. Ishibashi et al., *J. Magnetism*, 18 (2013) 317)。しかしながら、シミュレーションによるプローブ先端付近の電場分布を解析した結果、通常の方法では散乱型無開口プローブ先端に円偏光の電場分布を形成することが困難であることが明らかになった。

一方、ナノサイズの円偏光を実現する方法として、最近いくつかの報告がなされている。中川らは、電磁界シミュレーションにより、金薄膜に微細な十字構造を設けることで直径10 nmの領域に円偏光を生成可能であることを示している(K. Nakagawa et al., *JAP*, 109 (2011) 07B735)。また、Zhangらは、銀ナノワイヤーのプラズモンの伝搬を利用した偏光の制御が可能であることを示している(S. Zhang et al., *PRL*, 107 (2011) 096801)。以上の検討の結果、散乱型無開口プローブを用いた場合でも特殊な偏光制御技術を組み合わせることによって、ナノ領域での円偏光生成技術が開発可能であると判断した。散乱型無開口プローブをベースにした円偏光プローブが実現できれば、走査型近接場顕微鏡のプローブとして用いることができるため、10 nmの空間分解能を持った円二色性や磁気円二色性に関するイメージングが可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、近年注目を集めている近接場光を利用したナノ領域におけるフォトンクスに円偏光の生成と計測技術を組み合わせ、これまでにない新しいナノフォトンクス技術の開発を目的とする。ナノサイズの円偏光を生成するプローブ(ナノ円偏光プローブ)を電磁界シミュレーションの結果を基に設計し、微細加工技術を駆使することによって実現する。そして、10 nmの空間分解能を有する円偏光計測技術を開発する。さらに、超短パルスレーザーとの組み合わせにより、スピン制御などナノ秒、ピコ秒スケールでの円偏光と物質の相互作用に関する基礎実験によるナノ円偏光プローブの実証実験を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、3次元の電磁界シミュレーションを用いたナノ領域に円偏光を生成するためのナノ円偏光プローブの開発を行った。ナノ円偏光プローブは、散乱型無開口プローブをベースとして、円偏光生成のための特殊な構造を組み合わせることにより、プローブ先端にナノサイズの円偏光

を生成しようとするものである。そのために、まず、微小なアンテナ構造や回折格子など、光の位相を制御する構造のモデルを提案し、3次元電磁界シミュレーションによる円偏光生成のための最適な構造を検討した。初年度にメモリ容量の大きな計算用ワークステーションを導入し、有限要素法(FEM)をベースとしたComsol Multiphysics 4.3bのRadio frequency moduleを用いて行った。

本研究では、ナノサイズの円偏光を生成するための微細構造として、光の位相の制御に加えて、電場の増強効果が期待できるV型溝アパーチャアンテナ構造を検討した。具体的には、金薄膜上に形成したV型溝アパーチャアンテナ構造について、電磁界シミュレーションを用いて、円偏光度および電場分布の調査を行い、ナノサイズの円偏光を生成するための最適な構造を決定した。そして、実際に金薄膜に集束イオンビーム(FIB)を用いてV型溝アパーチャアンテナ構造を作製した。さらに、近接場光学顕微鏡を用いた測定により、V型溝アパーチャアンテナ構造近傍の電磁界分布の測定を行った。

近接場光学顕微鏡に使用可能なナノ円偏光プローブを実現するためには、AFM用プローブに用いられているような円錐型あるいは四角錐などの立体的な構造を用いる必要がある。そこで、本研究で提案するV型溝アパーチャアンテナ構造と円錐および四角錐の構造を組み合わせたプローブについて、電磁界シミュレーションを行い、最適な構造を検討した。そして、シミュレーションで得られた結果を基に、実際に円偏光プローブの作製を行った。プローブには、金を蒸着したSiN製のものを用い、FIBを用いて加工を行った。

#### 4. 研究成果

(1) ナノ円偏光を生成するためのV型溝アパーチャアンテナ構造の提案

本研究で提案した、ナノサイズの円偏光を生成するためのV型溝アパーチャアンテナ構造の例を図1に示す。この例では、高さ $H$ が35 nmの金( $n_{Au} = -11.753 + 1.2596i @ 633 \text{ nm}$ )基板上に開口角度 $\theta$ が105度、長さ $L$ が180 nmの二つのV型溝が直交するように配置した。二つのV型溝の交差点に半径 $R$ が5 nmの円柱型アパーチャを作製した。x軸とy軸は二つのV型溝の長軸に平行している。原点はV型溝アパーチャアンテナの底部の中心にある。図1(b)は断面(xz平面,  $y = 0 \text{ nm}$ )を示す。結果を記録するために、原点から5 nmを離れたところに観察面(xy平面,  $z = -5 \text{ nm}$ )を設置した。シミュレーションでは、電界強度が1 V/m、波長が633 nmの円偏光のV型溝アパーチャアンテナの表面に垂直に照射した。全部のシミュレーション範囲は完全吸収条件

(PML)で囲むことで、不要な反射光や散乱光の影響を無くした。シミュレーションの精度と計算時間を両立するために、最小サイズが0.1 nmの不均一なメッシュを用いた。

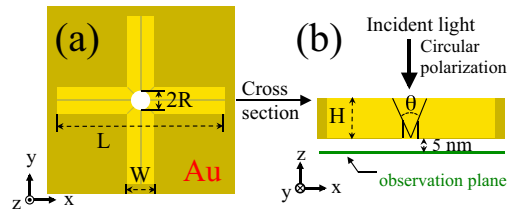


図1 V型溝アパーチャアンテナモデルの(a)上面図と(b)断面図。アパーチャアンテナの底面から5 nmのところにお観察面(xy平面)を設置した。

生成される円偏光を評価するために、次式により定義される性能指数 $F$ を用いた。

$$F = IC^2, \quad (1)$$

ここで、 $I$ と $C$ はそれぞれ電場の強度と円偏光度である。円偏光度 $C$ は式2に定義されている。

$$C = 2E_x E_y \sin(\delta_x - \delta_y) / I, \quad (2)$$

ここで、 $E_i$ と $\delta_i$ はそれぞれ電界の振幅と位相である( $i = x, y$ )。完全円偏光の $|C|$ は1である。

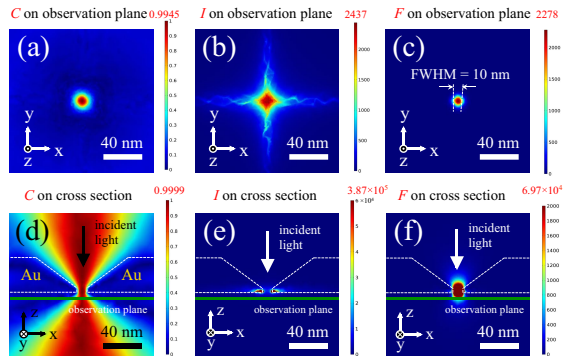


図2 (a-c)観察面と(d-f)断面上の電場の(a, c)円偏光度 $C$ 、(b, d)強度 $I$ 、(c, f)性能指数 $F$ の分布。

図2に $\theta = 105$ 度、 $L = 180 \text{ nm}$ の場合の結果を示す。図2(a-c)に観察面上の電場の $C$ (a)、 $I$ (b)、 $F$ (c)を示す。図2(a)から、アパーチャ(図の中心)に生じる電場の $C$ がほぼ1になることから、生成する光は円偏光であることがわかった。また、図2(b)に示すように、電場の強度は2400倍程度増幅されたことがわかった。さらに、図2(c)から、半値幅(FWHM)が10 nmの円偏光を生成することがわかった。以上の結果から、サイズが10 nm、入射光より3桁程度増幅

された円偏光の生成が可能であることがわかった。

次に、アパーチャーで生成する円偏光の強度が大きく増幅される理由を検討するために、図 2(d-f)に断面上の電場の  $C$ 、 $I$ 、 $F$  を示す。図 2(d)から、アパーチャーの中の光が円偏光になっているが、金の V 型溝上の光は直線偏光になることがわかった。これは、V 型溝の中に局在表面プラズモン (LSP) が励起されたためである。LSP の影響で、図 2(e)に示すように、アパーチャー付近の V 型溝の底部の光だけでなく、アパーチャー内で生成する円偏光も増幅された。また、図 2(f)から性能が良い円偏光はアパーチャーアンテナの中に生成されることがわかった。

これまでに、提案した V 型溝アパーチャーアンテナで、入射光の強度より 2400 倍以上増幅されるナノサイズ (FWHM = 10 nm) 円偏光の生成が可能であることを示した。円偏光の強度増幅は V 型溝の底部に励起された LSP のおかげだと考えられる。一方、LSP は V 型溝の形に依存することが知られている。そこで、V 型溝の長さ  $L$  を変化し、励起された円偏光の強度及び円偏光度を検討する。図 3 に、V 型溝の角度  $\theta = 105$  度において、観察面の中心における円偏光の強度  $I$  及び円偏光度  $C$  と V 型溝の長さ  $L$  (100 nm  $\leq L \leq 400$  nm) の関係を示す。

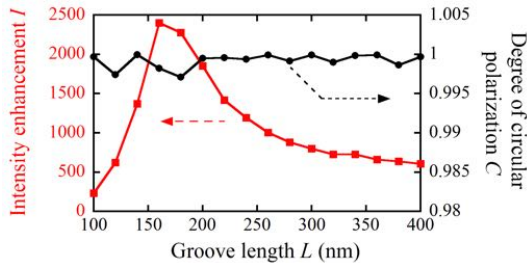


図 3 観察面の中心における円偏光の強度  $I$  及び円偏光度  $C$  と V 型溝の長さ  $L$  の関係。

図 3 から、観察面の中心における電場の  $I$  は  $L$  に大きく依存することがわかった。 $L = 160$  nm の場合において、励起された円偏光の強度 ( $I = 2398$ ) は一番大きいことがわかった。また、120 nm  $\leq L \leq 400$  nm において、観察面の中心の電場強度は 500 以上増幅されたが、観察面の中心における電場の  $C$  は  $L$  に依存せずほぼ 1 になることがわかった。以上の結果から、提案した V 型溝アパーチャーアンテナでは、V 型溝の長さが共鳴長さからずれても非常に良い性能を持つことがわかった。

提案する V 型溝アパーチャーアンテナを実用化するためには、円偏光の性能指数の距離及び波長依存性が重要である。図 4 に  $\theta = 105$  度及び共鳴長さである  $L = 160$  nm において、観察面の中心を通る  $z$  軸上の  $F$  の分布を示す。図 4 から、V 型溝アパーチ

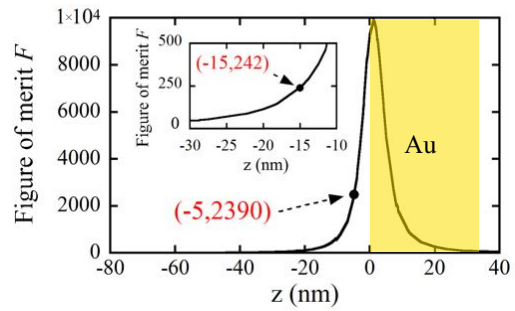


図 4 性能指数の  $z$  軸依存性。

ャーアンテナで励起された円偏光の性能指数は原点 (V 型溝の底面の中心) から  $-z$  軸に沿って指数関数的に減少するが、アパーチャーから 5 nm を離れたところで、 $F > 2300$  となり、15 nm を離れたところで、 $F > 240$  という結果になった。以上の結果から、提案した V 型溝アパーチャーアンテナの実用性は非常に高いと言える。

## (2) V 型溝アパーチャーアンテナ構造の作製と評価

ガラス基板上に蒸着した膜厚が約 70 nm の金薄膜に FIB を用いて V 型溝アパーチャーアンテナ構造を作製した。V 型溝の長さは 600 nm とし、溝の最深部がちょうど基板に到達する深さとした。この時、二つの V 溝を直交させることで、中心部にアパーチャーを形成した。作製した V 型溝アパーチャーアンテナ構造の形状および電場の増強効果を確認するために、SNOM を用いて評価を行った。図 5 に、測定した V 型溝アパーチャーアンテナ構造のトポ像と SNOM を示す。トポ像からは、設計通り構造が形成されていることがわかる。一方、SNOM からは、V 型溝の最深部において電場強度が強くなっていることがわかる。さらに、アパーチャー部分では電場強度がより強くなっていることがわかる。このことから、作製した V 型溝アパーチャーアンテナ構造において、チャンネルプラズモンポラリトンの生成とアパーチャー部分における電場の増強が起こっていることが示唆された。

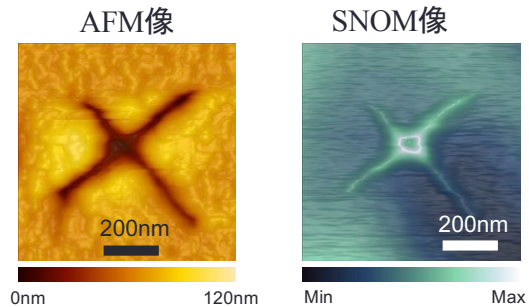


図 5 作製した V 型溝アパーチャーアンテナ構造の (a) トポ像と (b) SNOM 像。

(3) ナノ円偏光を生成するための SNOM 用プローブの検討

図 6 に提案したナノ偏光プローブのモデルを示す。先端を切断した円錐体の金プローブ（開口角  $2\theta = 30$  度、高さ  $H = 700$  nm）の周りに四つの V 型溝（V 型溝の角度  $\theta = 50$  度）を設けた。プローブの先端の半径  $R$  は 50 nm、V 型溝の底部から円心までの長さは 5 nm である。シミュレーションでは、電界強度 1 V/m、波長 633 nm の円偏光をプローブの長軸に沿って入射させた。

図 7 に観察面上の円偏光度  $C$ 、強度  $I$  及び性能指数  $F (= IC^2)$  の分布を示す。プローブの真下（図の中心）に生じる電場の  $C$  はほぼ 1 になることから、生成された光は円偏光であることがわかった。また、図 7(b) に示すように、中心部の電場強度は約 50 倍に増幅されることがわかった。さらに、図 7(c) から、性能指数はプローブ先端において大きな値を示し、その半値幅 (FWHM) が 10 nm であることがわかった。以上の結果から、提案したナノ円偏光プローブを用いると、10 nm 程度の大きさに入射光の約 50 倍の強度に増幅された円偏光を生成可能であることがわかった。

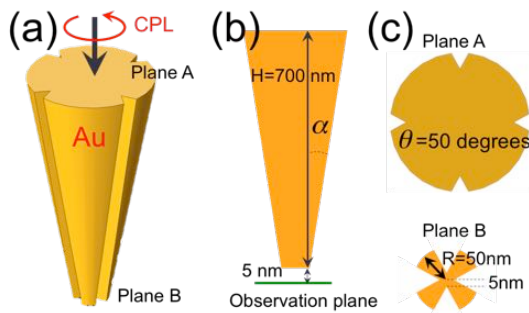


図 6 V 型溝アパーチャアンテナ構造を有する SNOM 用ナノ円偏光 Au プローブ。

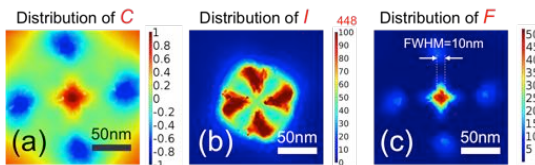


図 7 ナノ円偏光 Au プローブにおける (a) 円偏光度、(b) 強度、(c) 性能指数。

(4) Au 被覆した SiN 製プローブと V 型溝アパーチャアンテナ構造を組み合わせたナノ円偏光プローブ

V 型溝アパーチャアンテナ構造および AFM プローブに関する研究の結果から、実際に作製可能な構造として、Au 被覆した SiN 製プローブと V 型溝アパーチャアンテナ構造を組み合わせたナノ円偏光プローブを提案した（図 8）。この構造では、透明な SiN のプローブを用いることで、裏面からの光入射が可能になり、V 型溝アパーチャアンテナ構造へ効率よく光照射を行

うことができる。また、市販のプローブの形状は四角錐であるが、対称性がよいことから、円偏光生成が可能であると判断した。

図 9 に示すモデルを用いてシミュレーションを行い、性能を評価した。その結果、この構造の場合でも、性能指数は 23 と (3) で述べた円錐状の Au プローブを使った場合に比べて少し低下するが、ナノサイズの円偏光の生成が可能であることを確認することができた。

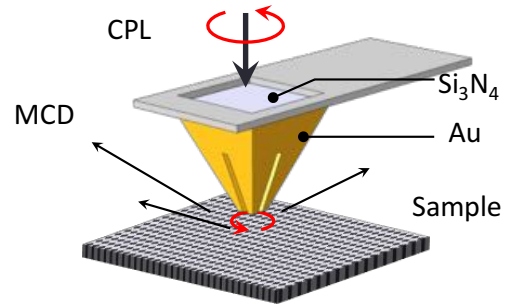


図 8 Au 被覆した SiN 製プローブと V 型溝アパーチャアンテナ構造を組み合わせたナノ円偏光プローブ。

### Au-coated SiN probe

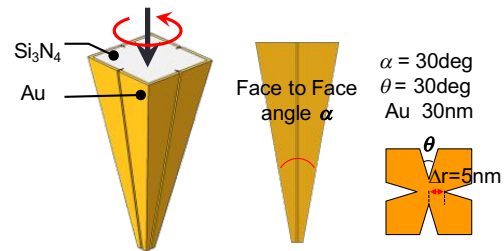


図 9 Au 被覆 SiN ナノ円偏光プローブのシミュレーションモデル。

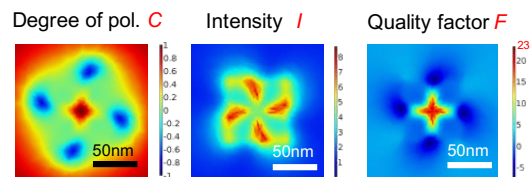


図 10 Au 被覆 SiN ナノ円偏光プローブに関するシミュレーションにより得られた (a) 円偏光度、(b) 強度、(c) 性能指数。

以上の実験結果を基に、実際に Au 被覆した SiN 製プローブと V 型溝アパーチャアンテナ構造を組み合わせたナノ円偏光プローブを作製した。V 型溝アパーチャアンテナ構造の形成は、FIB を用いて行った。図 12 に、作製した Au 被覆 SiN ナノ円偏光プローブの電子顕微鏡写真を示す。Au 被覆 SiN プローブの上に、設計通りの V 型溝アパーチャアンテナ構造が形成できている

ことが確認できた。このプローブを用いた、円偏光を用いた新しいナノフォトニクス技術の実現が期待される。

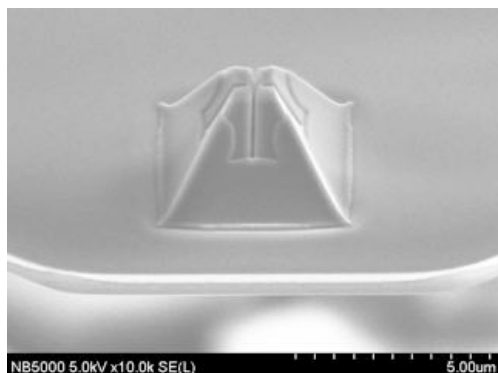


図 12 実際に作製した Au 被覆 SiN ナノ円偏光プローブの電子顕微鏡写真。

#### 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 7 件)

- (1) Yongfu Cai, Katsuji Nakagawa, Hiroshi Kikuchi, Naoki Shimidzu and Takayuki Ishibashi, Optimization of Aperture Antenna with V-groove Structures to Improve Intensity of Nanosized Circularly Polarized Light, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 17, pp.1970-1974 (2017).
- (2) Takayuki Ishibashi and Yongfu Cai, Polarization Properties in Apertureless-Type Scanning Near-Field Optical Microscopy, Proceedings of EMN Meeting on Optoelectronics 2015, Beijing, Nanoscale Research Letters 2015, 10:375 (29 September 2015)
- (3) Yongfu Cai, Soushi Ikeda, Katsuji Nakagawa, Hiroshi Kikuchi, Naoki Shimidzu, and Takayuki Ishibashi, Strong Enhancement of Nano-sized Circularly Polarized Light using an Aperture Antenna with V-groove Structures, Optics Letters, Vol. 40 Issue 7, pp.1298-1301 (2015).

[学会発表] (計 15 件)

- (1) Yongfu Cai, and Takayuki Ishibashi, Apertureless probe with V-groove structures for nanosized circularly polarized light, (Tu-9P-77), The 14th International Conference of Near-Field Optics, Nanophotonics and Related Techniques (NFO-14), September 4-8, 2016, Hamamatsu.
- (2) T. Ishibashi, Y. Cai, S. Ikeda, Polarization properties in aperture-less type scanning near field optical microscopy, B17 (April

26), EMN meeting on optoelectronics, April 24-27, 2015, Beijing, China. (invited)

- (3) Y. Cai, K. Nakagawa, H. Kikuchi, N. Shimidzu, and T. Ishibashi, Fabrication and characterization of the aperture antenna with V-groove structures to generate nanosized circularly polarized light, Mo-01-04, MORIS, Nov. 29 - Dec. 2, 2015, Penang, Malaysia.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

[http://mst.nagaokaut.ac.jp/~t\\_bashi/ISHIBASHI\\_LAB/Home.html](http://mst.nagaokaut.ac.jp/~t_bashi/ISHIBASHI_LAB/Home.html)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

石橋隆幸 (ISHIBASHI, Takayuki)  
長岡技術科学大学・工学研究科・教授  
研究者番号：20272635

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

小松高行 (KOMATSU, Takayuki)  
長岡技術科学大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60143822

##### (4) 研究協力者

なし