

機関番号：13701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560035

研究課題名（和文） プラズモン空隙光導波路を利用した高効率近接場光プローブのシミュレーションと実証

研究課題名（英文） Computer simulation and experimental verification of high performance optical near-field probe by using surface plasmon polariton gap waveguide

研究代表者

田中 嘉津夫 (TANAKA KAZUO)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40092944

研究成果の概要（和文）：

申請者らが提案したプラズモンギャップ (PG) プローブは、迷光が少なく低ノイズである開口プローブの長所と、高解像力を持つ散乱 (Tip) プローブの長所を併せ持っている。

平成20～21年度は主としてプローブ形状の最適設計するため、プラズモンギャップ導波路 (SPGW) の伝搬定数の計算を行った。解析手法として Method of Lines (MoL) を利用して、計算機コードを開発した。開発したコードを利用して SPGW の様々な形状の複素伝搬定数を求め、表面プラズモン伝搬における減衰定数を詳しく求めた。その結果、軸をずらしたスラブスラブ構造では、減衰定数を増加することなくナノサイズ光強度分布をさらに小さく集光できることを見出した。また、プラズモンギャップ導波路を利用したプローブ先端における近接場光の性質、とくに電界ベクトルの性質を詳しく分析し、近接場光分布はプローブ先端のナノ構造に大きく依存することを見出した。この結果はプラズモンギャップ (PG) プローブの設計は慎重に実行する必要があることを示している。

平成22年度はこのプローブを解析するためのシミュレーションコードを拡張改良した。現在、ほとんどのプラズモン・ナノフォトニクス研究室では、市販FDTD法コードをシミュレーションで利用している。これに対し申請者らは、体積積分方程式+Iteration法+FFTを使った高速解法（以下VIE-FFT法）に基づくシミュレーションコードを自作開発してきた。これまでの申請者らの結果と他研究室の論文との比較により、プラズモン・ナノフォトニクスの3次元大規模シミュレーションでは、VIE-FFT法はコード作成は面倒だがFDTD法より有用かつ精密な解を与えることが分かってきた。ドイツ・ミュンスターグループとの共同研究で行った三角錐プローブの大規模シミュレーションでVIE-FFT法はFDTD法に比べ高精度のナノ光分布を求めることができた。これはVIE-FFT法では、FDTD法で不可避な完全吸収層 (PML) と数値安定条件、を考慮する必要がないことが大きな要因と考えられる。そこで、さらなる大規模シミュレーションに適用可能なように、ソースコードの改良開発を行った。特に単精度整数しか利用出来なかったBLASの整数倍精度化、OpenMPを利用した大規模並列化を行った。

研究成果の概要（英文）：

The plasmon gap probe proposed by authors has the characteristics of low optical noise that is the advantage of the aperture probe and of high resolution that is the advantage of the scattering probe.

In 2008 and 2009, the complex propagation constants of the plasmon gap waveguide (PGW) have been calculated in order to obtain the optimum shape of the probe. The code of the numerical evaluation based on the method of line (MoL) has been made and developed. The complex propagation constants for various shapes of SPGW have been calculated by using the MoL code. Considering these kinds of numerical evaluations, it is found that the staggered structure of SPGW can make a localized and enhanced optical field on the probe tip without increasing the attenuation constant. The basic characteristics of the optical fields, especially vector fields, on the probe tip have been investigated in detail and it is found that they strongly depend on the nanometric structure of the probe tip. These results show that the design of the shape of the probe tip must be carefully performed in the practical applications.

In 2010, the computer simulation code used for the evaluation of the plasmonic gap probe, has been improved and extended. In the most of the laboratories who are investigating the subjects in the fields of the plasmonic-nanophotonics, the commercial simulation code based on the FDTD method is employed. Contrary, in the author's laboratory, the hand-made simulation code based on the volume integral equation with iteration method and fast Fourier transformation (VIE-FFT) is employed for the numerical simulations. Comparing the simulation results between by the FDTD and by the VIE-FFT, it is found that the results by VIE-FFT give the more accurate and more useful results than those by FDTD. For

example, in the collaborate study with a group of Munster University, the authors could obtain the more accurate results than those by FDTD method for the analysis of the optical field distribution of the tetrahedral plasmonic probe. The reason of these results is based on the facts that the VIE-FFT does not require the numerical stability conditions and absorbing conditions that are essential in the FDTD method and troublesome to set optimum conditions. Furthermore, the VIE-FFT simulation code is extended and improved for the large-scale problems by making the software package BLAS double precision and parallel code by the openMP.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：表面プラズモン，シミュレーション，プラズモニクス，光導波路

1. 研究開始当初の背景

走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) は走査型電子顕微鏡 (SMT) に匹敵する性能を持たず、研究開発も足踏み状況にあった。本研究はこのような状況を打破できる高効率プラズモン近接場光プローブの開発に関するものである。

2. 研究の目的

表面プラズモンギャップ導波路を利用すれば、大強度かつ微小なスポットサイズの近接場光を生成することができる。提案するプラズモンギャップ (PG) プローブは従来のプローブに比べ飛躍的に高効率なプローブを実現することが出来る。プラズモン・ギャップ・プローブ (PGプローブ) は、開口プローブの低雑音性と散乱 (Tip) プローブの高解像力、という双方の長所を持っている。本研究は PG プローブの基本特性をシミュレーションおよび実験により明らかにすることを目的とした。具体的には

- (1) 高効率 PG プローブの解像力・スループットの理論的限界 (シミュレーション)
- (2) 高効率 PG プローブの改良 (シミュレーション)
- (3) 高効率 PG プローブの実験的検証

について詳細に調べることが目的とした。

3. 研究の方法

体積積分方程式に基づく自作計算機コードを使い、厚みのある金属スクリーンに開けた開口の近接場光分布シミュレーションを行った。また、Method of Lines法を用いてプラズモン開口導波路の伝搬定数を固有値問題として求めるコードを開発した。波長より遥かに微小なスポットサイズを持つ

もかかわらず、従来の開口形状に比べ約100倍以上の近接場光強度を持つ垂鈴型 (I形状) 開口形状を見出した。この現象の原因を詳しく調べた結果、これはナノサイズの空隙 (gap) を持つ金属開口側面を伝搬する表面プラズモンポラリトン (以下プラズモン) 位相速度の空隙依存性、すなわち空隙が小さい程プラズモンの位相速度が遅くなるのが原因であることを突き止めた。

4. 研究成果

- ・体積積分方程式を利用したプラズモニクス・シミュレーションコードの改良。
- ・上記コードのテトラヘドラル近接場プローブへの適用。
- ・Method of Lines法を使ったプラズモン導波路の伝搬定数を求めるコードの開発。
- ・プラズモン近接場プローブの最適設計。
- ・プラズモン開口プローブの実験的検証。

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) Kazuo Tanaka, Kiyofumi Katayama, Masahiro Tanaka, "Nanofocusing of surface plasmon polaritons by a pyramidal structure on an aperture" *Optics Express* Vol. **18**, 787-798 (2010). (査読有)
- (2) 細野敏夫, 田中嘉津夫 "電磁界理論における解析手法の変遷と将来展望—電磁理論の諸問題と計算電磁気学における数値解法—", 電子情報通信学会論文誌C (招待論文), Vol. **J92-C**, 314-324 (2010). (査読有)

- (3) Tobias Maletzky, Kazuo Tanaka, Thierry Grosjean, Ulrich C. Fischer, "Leaky waveguide modes along the edge of a dielectric wedge", *Optics Letters*, Vol. **34**, 1909-1911 (2009). (査読有)
- (4) Kazuo Tanaka, Tran Trong Minh, Masahiro Tanaka, "Analysis of propagation characteristics in the surface plasmon polariton gap waveguides by method of lines", *Optics Express*, Vol. **17**, 1078-1092 (2009). (査読有)
- (5) Tran Trong Minh, Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka, "Complex propagation constants of surface plasmon polariton on rectangular waveguide by method of lines", *Optics Express*, Vol. **16**, 9378-9390 (2008). (査読有)
- (6) Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka, Kiyofumi Katayama and Daisuke Miyahara "Propagation constants of guided waves in surface plasmon polariton gap waveguides excited through an L-shaped aperture", *Comptes Rendus Physique*, Vol. **9**, 16-23 (2008). (査読有)
- (7) Kazuo Tanaka, G. W. Burr, T. Grosjean, T. Maletzky and U. C. Fischer, "Superfocussing in a metal-coated tetrahedral tip by dimensional reduction of surface-to edge-plasmon modes", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. **93**, 257-266 (2008). (査読有)

[学会発表] (計 15 件)

- (1) Kazuo Tanaka, Tran Trong Minh, Masahiro Tanaka, Kiyofumi Katayama, "Numerical Simulations of Surface Plasmon Gap Waveguides for Nanometric Optical Circuits", *The Third International Conference on Communications and Electronics Proceedings* (招待講演), Nha Trang, Vietnam, 6 pages (2010).
- (2) 田中嘉津夫, 片山清文, 田中雅宏, "微小開口側面に沿って形成された金属角錐構造によるSPPナノフォーカシングのシミュレーション", 電気学会電磁界理論研究会, 福島県麻耶郡猪苗代町リステルパーク (2010).
- (3) NGUYENTHEN DONG, 田中雅宏, 田中嘉津夫, "Analysis of scanning near-field optical microscopy with simple models", 電気学会電磁界理論研究会, 福島県麻耶郡猪苗代町リステルパーク (2010).
- (4) 田中雅宏, 田中嘉津夫, "モーメント法による二次元フォトニック結晶導波路/スラブ導波路の解析", 電気学会電磁界理論研究会, 福島県麻耶郡猪苗代町リステルパーク (2010).
- (5) 田中雅宏, 田中嘉津夫, "高速多重極展開法による二次元フォトニック結晶導波路シミュレーション", 電気学会電磁界理論研究会, 京都大学 (2009).
- (6) Kazuo Tanaka, Kiyofumi Katayama, M

- asahiro Tanaka, "Nanofocusing of surface plasmon polaritons by pyramidal structure on the aperture", The 7th Asia-Pacific conference on Near-Field Optics (APNFO-7), Jeju Island, Korea (2009).
- (7) Tran Trong Minh, Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka, "Propagation characteristics of the surface plasmon polariton trench waveguide", 電気学会電磁界理論研究会, 名工大 (2009).
- (8) Masahiro Tanaka and Kazuo Tanaka, "Computer simulations of 3-dimensional resonant iris waveguide by method of moment", 2009 Korea-Japan Joint Conference on AP/EMC/EMT, Incheon, Korea (2009).
- (9) Tien Dong Nguyen, Masahiro Tanaka, Kazuo Tanaka, "The calculation of far-field scattering properties by multiple spheres configuration", 2009年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 新潟大学 (2009).
- (10) Nguyen Tien Dong, 田中雅宏, 田中嘉津夫, "Analysis of electromagnetic scattering from multiple spheres configuration", 電気学会電磁界理論研究会, 沖縄県男女共同参画センター (2009).
- (11) 田中雅宏, 田中嘉津夫, "高速多重極展開法による二次元導波路解析", 電気学会電磁界理論研究会, 沖縄県男女共同参画センター (2009).
- (12) Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka and Kiyofumi Katayama, "Simulations of nanometric optical circuits by surface plasmon polariton gap waveguide", *Conference Proceedings, 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, (招待講演), Ukraine 59-64 (2008).
- (13) Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka, Kiyofumi Katayama, *Proceedings, XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science*, DB. 4, (2008).
- (14) Masahiro Tanaka, Kazuo Tanaka, "Comparison of two types of electric field integral equation for 3-dimensional waveguide", *The Second International Conference on Communications and Electronics Proceedings* (査読有), Hoi An, Vietnam, 324-329 (2008).
- (15) Kazuo Tanaka, Masahiro Tanaka and Kiyofumi Katayama, "Polarization control of nanometric optical fields by surface plasmon polariton gap waveguide", *The Second International Conference on Communications and Electronics Proceedings* (査読有), Hoi An, Vietnam, 324-329 (2008).

[図書] (計 1 件)

- (1) Kazuo Tanaka, "Surface plasmon pol

ariton gap waveguide and its applications”, *Plasmonic Nanoguides and Circuits*, ed. by Sergey Bozhevolnyi, Chap. 4, 95-126 (2009). (著書:分担執筆)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：近接場光プローブ
発明者：田中嘉津夫, 田中雅宏
権利者：国立大学法人岐阜大学
種類：
番号：GI-H21-42
出願年月日：2010年5月19日
国内外の別：国内, 国外

○取得状況 (計 1 件)

名称：光導波路
発明者：田中嘉津夫, 田中雅宏
権利者：田中嘉津夫, 田中雅宏
種類：
番号：特許第 4403281 号
取得年月日：平成 21 年 11 月 13 日
国内外の別：国内, 国外

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 嘉津夫 (Kazuo Tanaka)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号：40092944

(2) 研究分担者

田中雅宏 (Masahiro Tanaka)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号：80267848