

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：32644

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2014

課題番号：25706024

研究課題名(和文)高スループット光プローブによる高速ナノ光計測

研究課題名(英文)High-speed nano optical measurement with high throughput optical probe

研究代表者

立崎 武弘 (Tachizaki, Takehiro)

東海大学・工学部・講師

研究者番号：20632590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,600,000円

研究成果の概要(和文)：非破壊・非侵襲でのナノ分解能光計測を可能とするための原理検証と装置開発を実施した。数値計算により、極小光スポットの励起原理とその特性を確認し、高効率の光励起と低雑音計測を可能とするプローブ構造を見出した。開発した計測装置は、空間分解能3.0ナノメートル、測定再現性1.0ナノメートルの測定性能を示すことを実験で確認した。本技術は年間の優れた技術100選に送られる2014 R&D100 Awardを受賞するに至った。また、高速計測装置の開発を行い、毎秒1.8フレームの計測が可能な性能を確認した。
査読付論文3篇と学会発表5件(招待講演1件)、受賞1件の成果。

研究成果の概要(英文)：We recognized the generation of nano-metric optical spot through the near-field to near-field coupling by using FDTD numerical simulations. According to the investigation of the dependence of optical spot generation on the probe shape and physical properties, we found out the probe structure with high throughput.

We confirmed spatial measurement of 3.0 nm and measurement repeatability of 1.0 nm by demonstration experiments. These resolution and repeatability are the best in the world. We also developed a scanning probe microscope for fast optical imaging. This instrument satisfies the target of imaging rate: 1.8 Hz. Products: 3 peer-reviewed papers, 5 conference presentations(1 invited talk), and 1 prize.

研究分野：光計測

キーワード：ナノ光計測

1. 研究開始当初の背景

物質表面・界面における原子・分子スケールの物理現象を観察・計測する手段として各種ナノプローブ技術が発展してきた。1982年のピニツヒらによる走査型トンネル顕微鏡 (STM) の開発以降、しばらくは「固体表面」の「静的観察」がナノプローブ計測技術の中心であったが、その後プローブ加工技術と計測技術の高速化が著しく進展し、現在では「やわらかい生体物質」の「動的リアルタイム原子間力顕微鏡 (AFM) 計測装置」も開発されるに至り、液中で生命活動を保持したミオシン等のタンパク質の運動を分子レベルでリアルタイム・イメージ計測できるようにもなった。こうした活発な研究開発の結果、現在ではナノプローブ技術の適用範囲は物理から化学、生命科学に至るまで多岐にわたっている。

一方、光を用いたナノプローブ技術としては走査型近接場光顕微鏡 (NSOM) がよく知られている。光を用いない他のプローブ技術に比べると、NSOM は「光の周波数情報」と「光のエネルギー変化」という独自の情報を得ることができるため、光学誘電率の分布計測や、ラマン散乱による分子分光 [7] 等によって物質のナノスケールレベルの化学的性質を的確にとらえることができる。また「偏光」情報を利用したカー回転計測により、物質の磁気的性質も調べることができる。しかし現状の NSOM 装置はその近接場光励起効率が極めて低く、それゆえに数十分～数時間に及ぶ長大な計測時間を要することが課題であった。

2. 研究の目的

NSOM における計測時間を短縮することができ、『動的リアルタイム NSOM 計測』が実現できれば、ナノプローブ計測技術に革命が起きると考え、本研究に至った。前述のように NSOM は化学変化のプローブとして最適なので、これを生体計測に応用すれば生体表面のナノスケールレベルの機能発現の時間変化を追うことも可能になるだろう。そこで、申請者は以下の課題を克服し、新しい「高速 NSOM 観察技術」の開発を目指す。

課題 1 NSOM プローブの高効率化：高速 NSOM の実現には光プローブの高効率化が必須である。数値解析による構造最適化と試作を繰り返すことで、従来比で 10^3 倍～ 10^5 倍に相当する $1 \sim 10^{-2}$ 程度の近接場光励起効率の実現を目指す。

課題 2 高速スキャン装置の開発：課題 1 の超高効率近接場光プローブを活用した高速ナノ光計測を実施する。走査機構の高速化および近接場光の励起検出を高効率で実現可能な専用の走査プローブ顕微鏡を独自に開発し、 $0.01 \text{ s} \sim 10 \text{ s/frame}$ (横空間分解能： $< 50 \text{ nm}$ 、画像化範囲： $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 、解像度： $100 \text{ 点} \times 100 \text{ 点}$) の計測速度実現を目指す。

課題 3 物性計測：本装置の特徴を活用したリアルタイムナノ光物性計測を実施する。

次世代のスピンメモリとして注目を集めている強磁性体薄膜ディスクに中心に存在する特異的な渦中心磁化構造 (直径 $20 \text{ nm} \sim 30 \text{ nm}$) の可視化を行い、これが電磁場パルス印可によって反転する様子をリアルタイムに観察する。

3. 研究の方法

課題 1 超高効率プローブの創出については、時間領域差分法 (FDTD 法) による数値シミュレーションを活用して実施した。今回は、 10 nm 程度の空間におけるナノメートル寸法の光電場を計算する必要があり、比較的大きなメモリを用いた計算を実施せねばならない。そのため、新たに計算機とシミュレーターを導入した。計算モデルは、実際に使用するプローブ構造を電子顕微鏡観察し、その形状を忠実に再現した。

課題 2 高速スキャン装置の開発に関しては、独自の走査プローブ顕微鏡を設計・開発した。本研究で目指す計測には高速計測が可能であると同時に精度のよいナノポジショニングが必要であるため、高安定高速走査機構と高速のフィードバック機構とした。

具体的には、初年度目に機械・電気電子回路の設計を行った。実施した開発は、 2.2 kHz で駆動する位置決め精度が 0.1 nm のピエゾポジショニングと、 5.6 kHz でプローブ-サンプル間隔を制御可能な機構系である。また、フィードバック制御用の光学系と電気電子系も開発し、目標達成に必要な性能を確保できることを確認した (1.8 s/frame)。特に、計測の電子系には FPGA を用いるなどし、最速 100 kHz で計測が可能な制御系とした。

研究二年度目には、各要素から装置を組み上げる開発を実施した。主に制御プログラムの開発を行い、各要素を連動動作させてのプローブ顕微鏡を組み上げた。

課題 3 物性計測に関しては、マイクロメートル寸法の円形強磁性体における磁気構造の評価・計測を目指した。実施内容は (1) 円形マイクロ強磁性体構造の作製と、(2) 磁気渦構造の評価、(3) 高強度電磁パルス印加による磁気渦構造制御実験の 3 点である。

円形マイクロ強磁性体は、電子線リソグラフィと薄膜形成プロセスを駆使して作製した。寸法を直径 $5 \mu\text{m}$ と $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ の 3 種類とし、厚さ 30 nm とすることで、磁気渦構造をとるように設計した。試料内における磁化構造の評価は磁気光学カー効果により実施し (図 4 (a))、磁気渦構造を取ることを実験的に確認した。

円形マイクロ強磁性体における磁気渦中心へ電磁場パルスを印可し、その変化の様子をリアルタイム観察することを目指した。本研究では、磁気渦へ電磁パルスを印加して渦中心が変化するかを確認するための実験を実施した。

4. 研究成果

FDTD シミュレーション計算結果の一例を図1に示す。図は光によってもたらされた電場の強度分布を表しており、導光部であるシリコンチップ内を伝搬する励起光の干渉と、シリコンチップに設けられた金属薄膜端に発生した近接場光を確認できる。このチップ先端に発生する近接場光を、近接場-近接場結合によって、先鋭化されたプローブ先端に導き、ナノメートル寸法の光スポットを発生させられることを確認した。

シリコンチップへ施す金属薄膜の厚さや、金属薄膜へ施す微細加工の形状、プローブの伝導度依存性、およびプローブ形状の変化による光スポット電場強度の変化を明らかにした。現在までに、近接場励起に用いる励起光と同等の電場強度を有するナノメートル近接場光スポットを励起が可能であるとの結果を得ている。また、計測に不要な散乱光を抑止可能なプローブ構造を見出し、高効率で高 SN 比の光計測が可能になるとの結果を得ている。本成果は、現在投稿論文とすべく準備を進めている。

計測装置開発を通じて得られた知見は、高い空間分解能と高い測定再現性を実現する NSOM の開発に活かされ、年間の優れた技術開発 100 件に贈られる 2014 R&D100 Awards を受賞するに至った(日立製作所 横浜研究所 中田俊彦氏、馬場修一氏と共同受賞)。受賞した装置の概観写真を図2(a)に示す。

開発した装置を用いて実施した計測の結果を図3に示す。図3(a)は幅がナノメートル精度で制御された屈折率分布を持つ試料表面を計測した結果であり、明瞭に物質の違いを捉えていることが確認できる(図3(a)上にはサンプル模式図を並べて示した)。得られた二次元光学像の断面プロファイルの評価した結果が図3(b)である。散乱光の強度が物質境界で急峻に変化していることが確認でき、この変化の幅から、空間

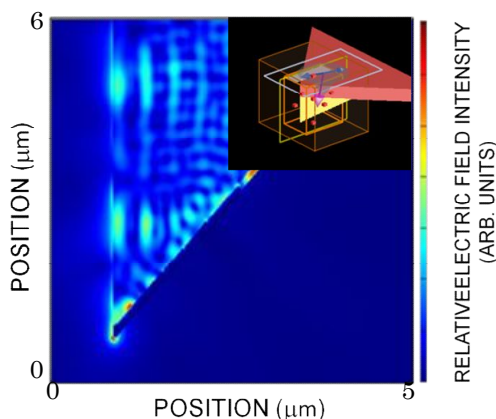


図1 FDTD シミュレーションによる数値解析の一例 シリコンチップ先端部における電場強度の計算結果を示す。電場強度は入射電場強度に対する相対的強度である。右上はシミュレーションで用いている三次元物理モデルを表す。

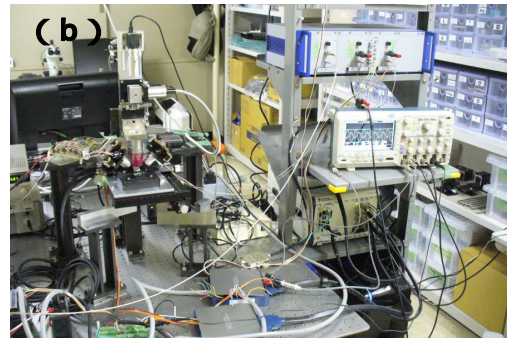
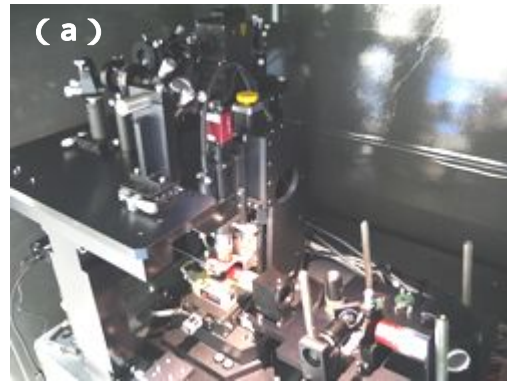


図2 開発装置外観写真 (a)空間分解能 3.0 nm、測定再現性 1.0 nm を実現した NSOM (b)新たに設計開発した 1.8 s/frame の高速計測が可能な NSOM

分解能が 3.0 nm に達すると評価できた。また、同じ資料の同じ場所を複数回測定した場合においても、同様のプロファイルを安定して得ることができたことより、測定再現性を 1.0 nm と評価した。本実験によって強化された分解能と測定再現性は、非常に優れており、世界最高の光計測を実現できたことを示すことができた。本成果は現在、論文誌へ投稿中である。

高速計測を実現する為に開発したプローブ顕微鏡の概観写真を図2(b)に示す。本装置は、近接場光スポットからの散乱光を効率よく集光するための光学系を組込むことを考慮して、プローブまわりの空間を大きくとるなど、独自の設計を施している。本プロトタイプ計測装置は、1.8 フレーム毎秒の計測が可能な性能を出せるまで開発が進んだ。この計測速度は当初目的を達成する性能である。現在は安定した高速計測を達成するための細部の調整とパラメータチューンを実施している。本成果は、装置開発を中心とした内容での学会発表ないし論文として公表をするべく準備を進めている。

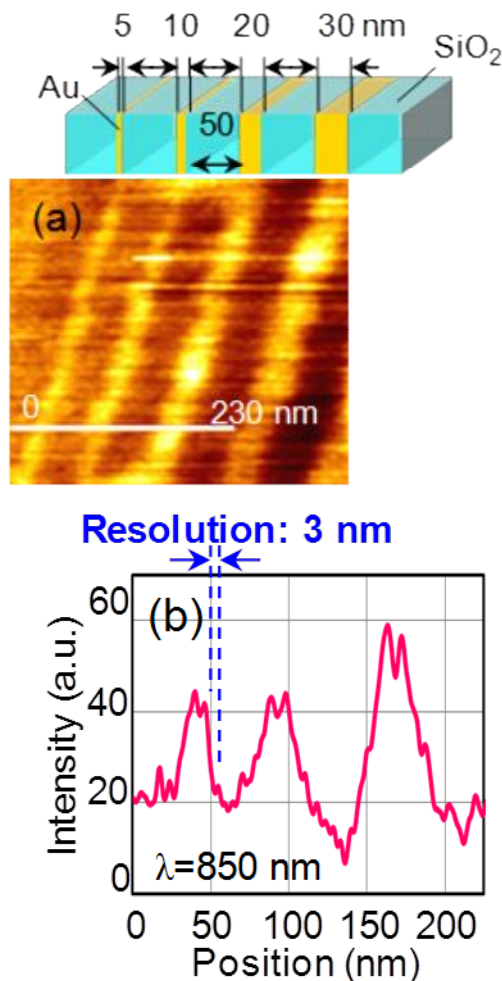


図3 実証実験の結果 (a) 開発したNSOMによって計測したサンプル表面の屈折率分布 図の明暗は屈折率の大小を表わす。(b) 計測結果の断面プロファイル 横軸に計測空間、縦軸に屈折率変化を任意単位で示す。3.0 nmで屈折率が変化している様子が明瞭に確認できる。

計測対象であるマイクロメートルスケールの磁気ディスクを作製し、マイクロ波掃引スペクトル計測と顕微磁気光学カー計測によって、磁気ディスク内の磁化が渦構造を示すこと確認した。本評価に用いた設備はいずれも小型で簡便な構成となっており、計測装置としての新規性が含まれているため、成果を公表する予定である。

磁気渦の制御を目的に、6.6 mT から 39 mT までの強度を持つ持続時間がピコ秒 ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) の電磁パルス (高強度テラヘルツパルス) を照射する実験を実施した。この電磁パルスの照射前後で磁気渦中心のポラリティが変化するかを、磁気渦へマイクロ波を印加して、その整流スペクトルを計測する方法によって実施した (図4 (b))。結果は図4 (b) に示す通りで、印加する磁場強度を強くすると整流スペクトルのピークの向きが変化し、磁気渦中心の状態が変化したことを示唆している。これらの結果より、持続時間 1 ps、磁場強度 39 mT の電磁パルスを印加

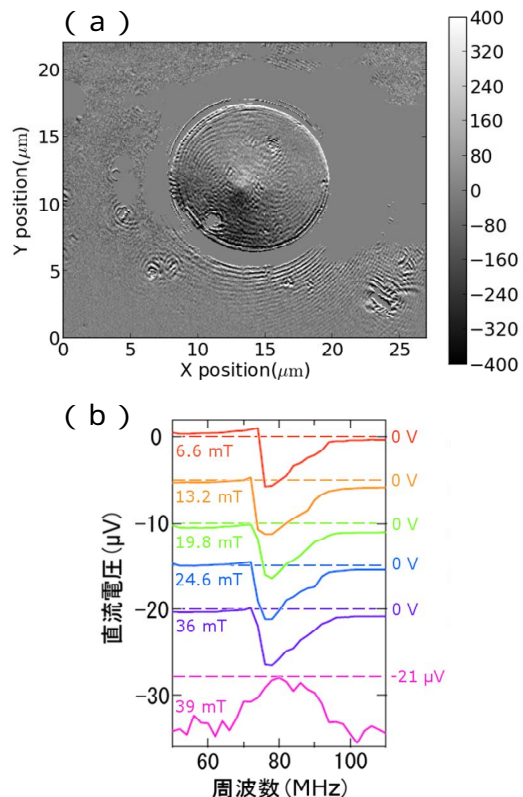


図4 マイクロ磁性体評価結果 (a) 作製した円形マイクロ磁性体の二次元磁気光学カー効果像 色の濃淡は任意強度で表した磁化の向きに対応する量である。(b) 磁気渦中心のポラリティを電気的に評価するための整流電圧スペクトル 横軸は試料へ印加したマイクロ波の周波数を、縦軸は整流電圧を表す。視認性を考慮して縦軸には適宜オフセットをつけてある。

した場合、磁気渦中心のポラリティを制御できる可能性を確認できた。

これはピコ秒 (テラヘルツ) での磁気スイッチや高速高密度メモリ素子となる可能性を秘めた新規性の高い結果であるため、荒削りではあるが、日本物理学会 第70回年次大会において発表した。

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3件)

(1) Mayuko Takai, Masatoshi Takeda, Manabu Sasaki, Takehiro Tachizaki, Naoya Yasumatsu and Shinichi Watanabe, "Video-rate terahertz electric-field vector imaging", Applied Physics Letters 105(15), 151103(2014). 査読有

(2) Osamu Matsuda, Motonobu Tomoda, Takehiro Tachizaki, Shun Koiwa, Atsushi Ono, Kae Aoki, Ryan P. Beardsley, and

Oliver B. Wright, "Ultrafast ellipsometric interferometry for direct detection of coherent phonon strain pulse profiles", J. Opt. Soc. Am. B 30(7), 1911-1921(2013). 査読有

(3) Shinichi Watanabe, Naoya Yasumatsu, Kenichi Oguchi, Masatoshi Takeda, Takeshi Suzuki and Takehiro Tachizaki, "A Real-Time Terahertz Time-Domain Polarization Analyzer with 80-MHz Repetition-Rate Femtosecond Laser Pulses", Sensors 2013, 13(3), 3299-3312(2013). 査読有

〔学会発表〕(計5件)

(1) 曾澤将昇, 立崎武弘, Xavier Ropagnol, Hadi Razavipour, 尾崎恒之, David Cooke, 能崎幸雄, 渡邊紳一, "強磁性体磁気渦構造への高強度テラヘルツ光パルス照射実験", 日本物理学会 第70回年次大会 2015年3月21日~24日(24aCN-8).

(2) 立崎武弘(招待講演), "高空間分解・高再現性を実現する近接場光計測", 第15回レーザー学会東京支部研究会 電気学会光・量子デバイス技術研究会(東海大学高輪キャンパス), 2015年3月5日.

(3) 黒木諒, 金子和樹, 立崎武弘, 宮崎貴洋, 渡邊紳一, 渡邊幸志, 梅澤仁, 鹿田真一, 伊藤公平, 早瀬潤子, "金コートAFMチップによるダイヤモンド窒素空孔中心の発光増強", 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月25日~9月28日(26pPSB-55)

(4) Masatoshi Takeda, Takehiro Tachizaki, Naoya Yasumatsu, Shinichi Watanabe, "Terahertz electric-field vector camera", CLEO2013, San Jose, USA 9-14 June 2013 (CW1K.1).

(5) K. Oguchi, N. Yasumatsu, M. Takeda, T. Tachizaki, and S. Watanabe, "An oscillator based real-time terahertz time-domain polarization measurement system with a spinning electro-optic crystal", International Workshop on Terahertz Science and Technology 2013 (Kyoto, Japan), April 1-5, 2013 (W3C-4).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://aom.eh.u-tokai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

立崎 武弘(TACHIZAKI Takehiro)
東海大学 工学部 光・画像工学科 講師
研究者番号: 20632590

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: