

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310073

研究課題名(和文) 光周波数コムを利用した周波数 & 時間分解近接場磁気光学顕微鏡の研究開発

研究課題名(英文) Development of frequency and time resolved SNOM using optical frequency comb

研究代表者

石橋 隆幸 (Ishibashi, Takayuki)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：20272635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ領域での磁気特性を評価するため、アパーチャーレスプローブを用いたSNOMの構築と、偏光特性の調査をおこなった。その結果、約10 nmの空間分解能と良好な偏光特性を実現するとともに、アパーチャーレスSNOMにおいて問題であった背景光と信号光の分離に成功した。FDTDシミュレーションでは、実験で得られた偏光特性をほぼ正確に再現することに成功し、プローブ周辺の電場分布を理解することができた。さらに、時間分解測定を実現するための装置の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：We have developed an apertureless SNOM (a-SNOM), and have studied the polarization properties of the a-SNOM. As a result, we have succeeded to obtain a spatial resolution of approximately 10 nm. In addition, we have also succeeded to resolve a SNOM signal and a background signal. FDTD simulation explained our experimental results well, and consequently, we understood electric fields underneath apertureless probes. Furthermore, we developed a system for time-resolved SNOM measurement.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学

キーワード：近接場光学顕微鏡 偏光特性 FDTDシミュレーション 磁気光学効果

1. 研究開始当初の背景

近年、電子が持つスピン角運動量の自由度を利用するスピントロニクスが注目を集めている。特に、トンネル磁気抵抗効果 (TMR) 素子や巨大磁気抵抗効果 (GMR) 素子をはじめとする強磁性体を用いたスピントロニック素子は、ハードディスクの読み出し用ヘッドなどの磁気センサーとして実用化が進んでいる他、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)、マイクロ波発振器、スピントルクダイオードなどの研究が精力的に進められている。さらには、サブミクロンサイズで高速なことからホログラフィーによる3次元ディスプレイに応用できる空間光変調器などへの応用研究も進められている。このような背景の下、サブミクロンサイズの素子の評価技術の開発が急務となっている。

現在、サブミクロンスケールの磁気特性の評価法としては、磁気力顕微鏡 (MFM) や X 線の磁気円二色性を測定する方法 (XMCD) がある。しかし、MFM は探針に用いている磁性体からの漏洩磁界が試料に影響を与えてしまうという致命的な問題がある。一方、XMCD 法は、高い分解能と高速な測定が可能であるが、放射光施設が必要であるという問題点がある。また、どちらの場合も可視光領域の評価はできない。これらに対して、近接場を利用した MO-SNOM は、光の回折限界を超えた数十ナノメートルの空間分解能で、磁気光学効果の評価を行うことができる。さらに、非磁性の探針を用いることから磁気的な相互作用がないこと、高速な計測技術と組み合わせが可能であるという特長を持つ。つまり、MO-SNOM は上で述べた目的を達成するには唯一の方法である。

2. 研究の目的

本研究では、それらの素子のナノ領域での磁気特性を評価するため、50 nm 以下の空間分解能とピコ秒スケールの磁化反転特性およびその周波数が可能なこれまでにない全く新しい磁気イメージング技術を開発する。高分解能なイメージング技術には、有限差分時間領域 (FDTD) 法による数値シミュレーションを基に、アパーチャーレス光プローブを用いた反射型の近接場磁気光学顕微鏡 (MO-SNOM) を開発する。そして、ピコ秒スケールの現象を時間軸だけでなくその周波数も同時に計測可能な 2 波長同時ヘテロダイン検波法を MO-SNOM に組み合わせた新しい磁気イメージング技術を開発する。

3. 研究の方法

装置一部の概略図を図 1 に示す。光源には波長 408nm の半導体レーザーを用い、試料に対して約 45 度の入射角でカンチレバー先端に照射している。もともとこの光源から出射される光は s 偏光であるが、 $\lambda/2$ 板と偏光子を回転させることで偏光状態を変えることができる。プローブには、DFM 用シリコン

カンチレバーと、DFM 用の Au コーティングシリコンカンチレバーを用いた。散乱光は光電子増倍管 (PMT) で検出した後、AFM 電装部から出力されるカンチレバー加振電圧を参照信号としてロックイン検出を行い、背景光からのノイズを除去した。散乱光の偏光特性は、シリコンカンチレバーを試料に接近させた状態で、検光子を 10 度間隔で回転させながら散乱光の信号強度を測定することによって調べた。試料は石英基板上に作製された厚さ約 20nm の Cr パターンを用いた。

また、実験に加えて、プローブ先端付近の電界を調べるために、時間領域差分 (FDTD) 法によるシミュレーションを行った。使用したソフトは、Rsoft 社の Fullwave である。

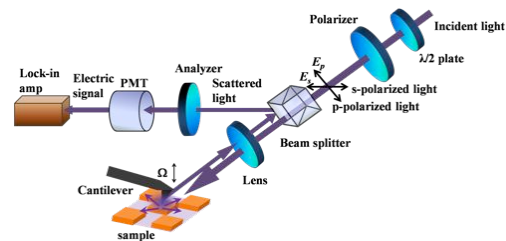


図 1 開発した SNOM の光学系

4. 研究成果

(1) a-SNOM の偏光特性

SNOM 用テストパターン (1.5 μm チェッカーパターン) について測定したトポ像を図 2 に示す。(b)、(c) は、それぞれ参照信号をカンチレバーの共振周波数の基本周波数および 2 倍の周波数としたときの SNOM 像である。トポ像と同様に明瞭なチェッカーパターンの SNOM 像が得られていることがわかる。

次に、図 3 (a) にアナライザーを 20 度ずつ回転させて測定したときの AFM 像と SNOM 像を示す。図 3 (b) は散乱光の強度とアナライザー回転角の関係を示している。SNOM 像における三つの信号強度の異なる部分はそれぞれアナライザーの角度が 0 度、20 度、40 度の光強度に対応している。アナライザーを回転させることで SNOM 像の信号強度も小さくなっていくため、SNOM 像の計測においても偏光状態を保存していることが分かる。

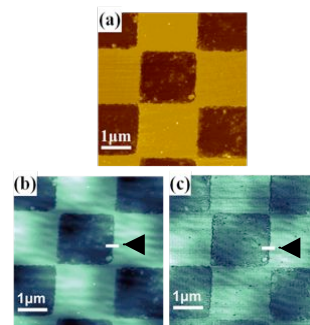


図 2 Cr テストパターンの (a) AFM 像と (b)、(c) S 偏光の光を入射させて測定した SNOM 像

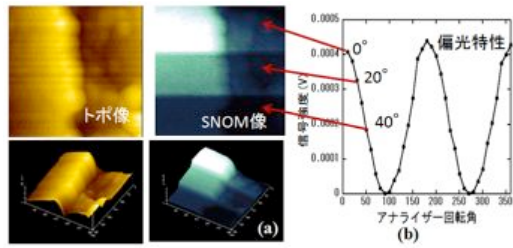


図 3 (a) 偏光子を回転させながら測定した AFM 像と SNOM 像。(b) 信号強度の検光子角依存性。

上述した結果では、s 偏光の時に検出される信号光も直線偏光となることが示されたが、入射光の方位角が斜めの場合には、信号強度の検光子角依存性の極プロットは図 4 (a) に示すようなクローバー型となる (方位角 40 度)。このことを説明するために、実測された光強度を近接場光からの信号光と背景光が重なったものとして、次式によりフィッティングを行った。

$$S = a_N \cos^2(\theta + \alpha_N) + \beta_N - a_B \cos^2(\theta + \alpha_B) - \beta_B \quad (1)$$

ここで、背景光として試料の Cr およびカンチレバーの Si での反射を仮定して、各入射偏光面に対する背景光の方位角 ϕ_B と楕円率 η_B を求めた。(1) 式に、これら ϕ_B 、 η_B を代入すると、背景光の強度は次式となる。

$$A_B = a_B \cos^2(\theta + \psi_B) + \frac{\eta_B^2 a_B}{(1 - \eta_B^2)} \quad (2)$$

$$\eta_B^2 = \frac{\beta_B}{(\alpha_B + \beta_B)} \quad (3)$$

また、近接場光からの散乱光はを次式のように表す。

$$A_N = a_N \cos^2(\theta + \alpha_N) + \beta_N \quad (4)$$

この (2)、(4) 式を、足し合わせることで計測される光強度を次式のように表した。

$$S = a_B \cos^2(\theta + \psi_B) + \frac{\eta_B^2 a_B}{(1 - \eta_B^2)} + a_N \cos^2(\theta + \alpha_N) + \beta_N \quad (5)$$

シミュレーションで求めた ϕ_B と η_B を代入し、 a_B 、 a_N 、 α_N 、 β_N をパラメータとして近接場光の解析を行った。

入射偏光面の角度は 40 度とした時のフィッティング結果を図 4 (b) に示す。実験結果を良く再現していることがわかる。同様に、0 度から 360 度の場合についてフィッティングを行った。その結果から得られた近接光と背景光の比を方位角に対してプロットした結果を図 5 に示す。この図から光偏光面が 60 度の時に二つの方位角に大きな差が出ることがわかった。また、この入射偏光面 60 度での信号強度の差は、検光子 140 度付近で大きくなることわかった。

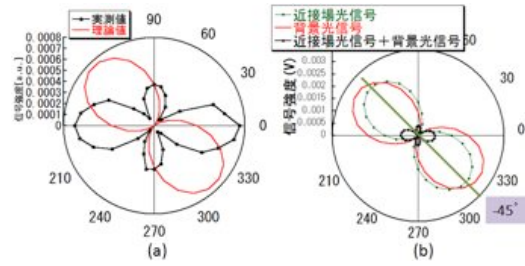


図 4 方位角が 40 度の時の (a) 信号強度の検光子角依存性と (b) フィッティング結果

この結果に基づき、入射光偏光面 60 度、検光子 0、50、130、140、150、230 度での SNOM 像の測定を行った。SNOM 像の測定結果を図 5 に示す。検光子 150 度付近で干渉縞の少ない SNOM 像を測定することができた。この結果から、シミュレーションを基にした偏光特性の解析が、適切であったことを示すと同時に、a-SNOM において背景光を除去した偏光像の測定が可能であることがわかった。

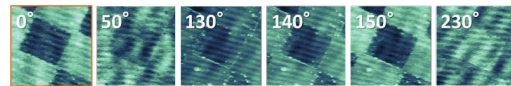
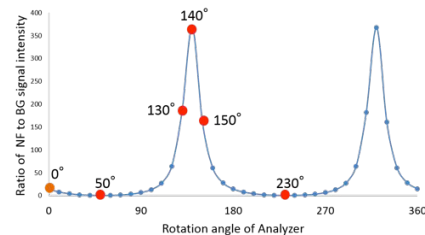


図 5 60 度偏光入射時の (a) 近接場光/背景光強度比 および (b) 検光子を回転させた SNOM 像 ($4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$)

(2) FDTD シミュレーション

図 6 にシミュレーションに用いたモデルを示す。プローブは、立体角が 15 度、先端曲率半径が 7 nm のシリコン ($n=5.476+i0.31 @405 \text{ nm}$) プローブとした。試料はクロム ($n=1.80+i3.61 @405 \text{ nm}$) を用い、プローブと試料の間の距離を 10 nm、プローブの軸と試料の法線との角度を θ 度とした。波長が 405 nm、パルス幅 2.1 fs の平面波を試料と 45 度の角度で入射させた。3 次元のモニターを用いて、入射光と戻ってきた散乱光の電界成分の時間変化を記録した。このモデルは、上で述べた実験とほぼ同じ状況を再現したものである。メッシュのサイズは $3 \times 3 \times 3 \text{ nm}^3$ とした。

p 偏光を入射させた時の電界強度分布を図 7 (a) に示す。カンチレバー先端において電界強度が増強されていることがわかる。また、散乱光がプローブ先端から広がっているこ

ともわかる。図8は、p 偏光を入射させた時の電界強度の時間変化を示している。この場合、散乱光は入射光と同じ E_z 成分のみからなることがわかる。同様に、s 偏光の場合も入射光と同じ E_y 成分のみが観察された。以上の結果は、p 偏光、s 偏光のどちらの場合についても、偏光状態が保存されることを示しており、実験結果をよく再現している。

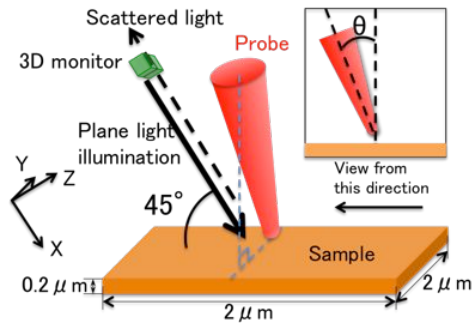


図6 シミュレーションに用いたモデル

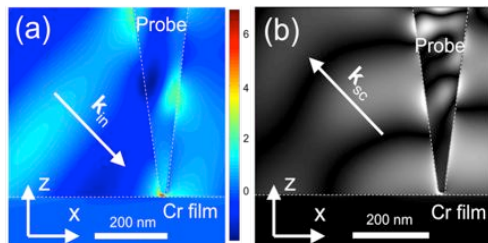


図7 プローブ先端の電場分布
(a) 入射光照射時、(b) 散乱光

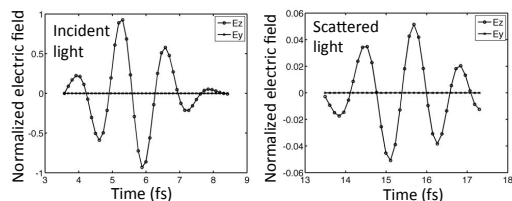


図8 p 偏光を入射させたときの (a) 入射光と (b) 散乱光の電場の時間変化

一方、シミュレーションによって得られたプローブの下の電場を解析した結果、入射光の方位角を変化させた場合、ほとんどの場合、プローブの下の電場の振動方向は試料と垂直になることがわかった。また、s 偏光近傍の方位角の場合については、プローブと試料の間に強い近接場光が生じず、プローブの下の電場の振動方向は試料と垂直になることがわかった。この結果を図9に示す。この結果は、プローブと試料を含む系が、光を照射されたときに生じるモードによってプローブの下の電界が決定されることを意味している。別の見方をすると、いろいろな偏光状態の光を入射させた場合でも、プローブの下の電場は図9に示した二つの状態しかとることができない。つまり、プローブの下には、

直線偏光のみが存在できることになる。このことは、我々が目標とする円偏光の応答である磁気光学効果の測定が困難であることを示している。以上のことから、プローブの形状や光の照射方法を工夫して円偏光を生じさせる方策を検討する必要があることが明らかになった。

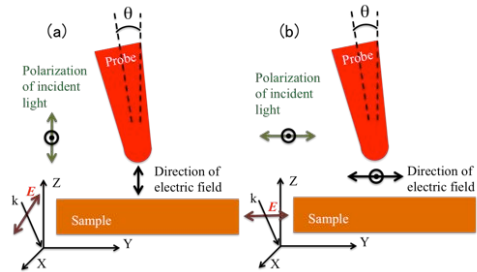


図9 プローブの下の電場の振動軌跡

(3) 2波長同時ヘテロダイン検波法とMO-SNOMに組み合わせた新しい磁気イメージング装置の構築

ピコ秒スケールの現象を時間軸だけでなくその周波数も同時に計測可能な2波長同時ヘテロダイン検波法をMO-SNOMに組み合わせた新しい磁気イメージング技術を開発するため、100フェムト秒のパルスを生成できるTi:サファイアレーザーとSNOMを組み合わせた装置の構築を行った(図10)。また、2波長同時ヘテロダイン検波法の回路設計を行った。しかしながら、前述したように、アパーチャーレスプローブは良好な偏光特性を示すことが明らかになったものの、磁気光学効果の測定に必要な円偏光を得ることが容易ではないことがわかった。そのため、アパーチャーレスプローブを用いた円偏光の生成が今後の課題である。

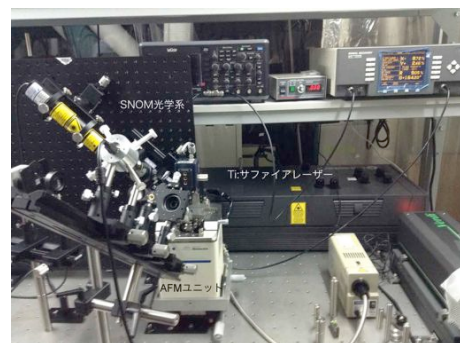


図10 構築したSNOM装置

5. まとめ

本研究では、アパーチャーレスプローブを用いたSNOMを構築し、約10 nmの空間分解能と良好な偏光特性を実現した。また、アパーチャーレスSNOMにおいて問題となる背景光と信号光の分離に成功した。FDTDシミュレーションにおいては、実験で得られた偏光特性をほぼ正確に再現することに成功

し、プローブ周辺の電場分布を理解することができた。さらに、時間分解測定を実現するためのTi:サファイアレーザーとSNOMを組み合わせたシステムを構築し、2波長同時ヘテロダイン検波法の回路設計を行った。

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7件)

- ① Y. Cai, Q. Meng, A. Emoto, T. Shioda, H. Ono, T. Ishibashi, FDTD simulation for polarization state of scattered light in apertureless SNOM, J. Mag. Soci. Jpn. (2014). (査読有)
- ② Y. Cai, M. Aoyagi, A. Emoto, T. Shioda and T. Ishibashi, Polarization state State of scattered Scattered light Light in Apertureless Reflection-mode Magneto-optical Scanning Near-Field Optical Microscopy, J. Magnetism, 18 (2013) pp. 317-320. (査読有)
- ③ M. Aoyagi, S. Niratisairak, T. Shioda, and T. Ishibashi, Extinction Ratio in Apertureless Reflection-Mode Magneto-Optical Scanning Near-Field Optical Microscopy, IEEE TRANS. MAGN. VOL. 48, NO. 11, NOV. (2012) pp. 3670-3673. (査読有)

[学会発表] (計23件)

- ① Q. Meng, H. Miyajima, Y. Cai, H. Ono, A. Emoto*, T. Shioda, T. Ishibashi, Polarization property of apertureless near-field scanning optical microscopy, Magnetism and Optics Research International Symposium (MORIS2013), Tu-P-27, December 2-5, OMIYA SONIC CITY, Saitama.
- ② Y. Cai, M. Aoyagi, S. Niratisairak, A. Emoto, T. Shioda and T. Ishibashi, Polarization state of scattered light in Apertureless Reflection-mode Magneto-optical Scanning Near-Field Optical Microscopy, (RP17, July 12) The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012), July 8-13, 2012, Bexco, Busan, Korea
- ③ M. Aoyagi, S. Niratisairak, T. Shioda, and T. Ishibashi, Extinction Ratio in Apertureless Reflection-mode Magneto-optical Scanning Near-Field Optical Microscopy, IEEE International Magnetism Conference—Intermag 2012, 7 - 11 May 2012, Vancouver, B. C., Canada.

[その他]

ホームページ等

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・工学部・准教授
研究者番号：20272635

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

塩田 達俊 (SHIODA, Tatsutoshi)
埼玉大学・工学部・准教授
研究者番号：10376858