

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760263

研究課題名(和文) 走査型非線形誘電率顕微鏡を用いたエネルギーアシスト方式強誘電体記録

研究課題名(英文) Energy-assisted ferroelectric recording using scanning nonlinear dielectric microscopy

研究代表者

山末 耕平 (Yamasue, Kohei)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：70467455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：強誘電体を記録媒体とし、ナノスケールの分極反転を用いる強誘電体プローブメモリは、記録密度において限界を迎えつつある現行の磁気記録を代替する可能性で知られている。本研究では、分極反転のエネルギー障壁を低減させることで、分極反転を容易化するエネルギーアシスト方式強誘電体記録の実現に向けた基礎研究・装置開発を行った。走査型非線形誘電率顕微鏡(SNDM)をベースとして、既存のSNDM装置に組込可能なヘッドを新規に設計・開発した。また、分極反転に必要な印加電圧を系統的に得る手法を確立するため、反転を検出する非線形誘電率信号に基づいて印加電圧を決めるフィードバック機構について理論的検討と実装を行った。

研究成果の概要(英文)：Ferroelectric probe data storage has been known as a promising recording technology, because it is a potential candidate to replace the existing magnetic recording. In this research project, we performed a fundamental study and equipment development towards energy-assisted ferroelectric recording to reduce the energetic barrier height of polarization reversal by introducing external energy. We designed a recording head that can be integrated with scanning nonlinear dielectric microscopy (SNDM). In addition, we studied feedback mechanism to systematically identify the voltage necessary for the formation of nanodomains. We theoretically discuss the features of this feedback mechanism and also implemented it to an actual SNDM.

研究分野：プローブ顕微鏡

キーワード：強誘電体記録 走査型非線形誘電率顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

近年、情報化の進展による情報量の急激な増大により、大量かつ高速に情報を記録する技術への要求は高まる一方である。しかしながら、記録技術として、現在、広く普及している磁気記録の記録密度は、既に限界に達しつつあると言われている。このため、1 Tbits/inch² を超える記録密度を持つ次世代記録方式の研究が進められている。その中で、近年、強誘電体材料を記録媒体として用い、ナノスケールの分極反転を利用する記録方式である強誘電体プローブメモリが研究されている。強誘電体は、強磁性体よりはるかに薄い1, 2単位格子程度のドメイン壁を実現できると言われている(図1参照)。したがって、強誘電体の微細なドメインを自在に制御できれば、磁気記録の限界を上回る記録密度を持つ次世代の高密度記録デバイスが実現できる可能性がある。既に、強誘電体材料の分極分布をナノスケールで観察、操作可能な走査型非線形誘電率顕微鏡(Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy; SNDM. 図2参照)を用い、SNDMのプローブをデータを読み書きするヘッドとして利用することで、実記録記憶密度で4Tbits/inch²が達成されている。これは、既存の磁気記録の記録密度や大幅に上回るものである。さらに、近年では、強誘電体記録の実用化を目指し、磁気ハードディスクドライブ(HDD)の代替を目指した回転ディスクタイプの強誘電体プローブメモリの開発も行われている。

しかしながら、このように次世代記録方式として、強誘電体記録の研究が進展する一方で、実用化に向けて解決すべき課題が依然残されている。課題の一つは、書き込み・消去におけるロバスト性の確保である。強誘電体プローブメモリでは、記録、消去時に分極反転を誘起するため、プローブと記録媒体間に高電界・高速パルスを印加する必要があるが、これにともない、探針先端を摩耗したり、極端な場合は探針の破壊が生じる。このため、現状では、書き込み・消去を安定して繰り返すことや、長時間に亘って安定して高速動作させることは必ずしも容易ではない。しかしながら、磁気記録を超える高密度記憶デバイスとして、これらの問題を解決することは、強誘電体プローブメモリの実用化に向けて避けて通ることはできない。

2. 研究の目的

上記の問題を解決する一つのアプローチとして、本研究ではエネルギーアシストを用いた強誘電体記録を新たに提案する。分極反転を生じさせるためには、異なる分極状態を隔てるエネルギー障壁を超える必要がある(図3参照)。エネルギーアシスト方式とは、外部エネルギーを投入することで、障壁高さを低下させる、もしくは分極に関わる双極子を共鳴状態にすることで、エネルギー障壁を実質的に低下させ、分極反転を容易にしよう

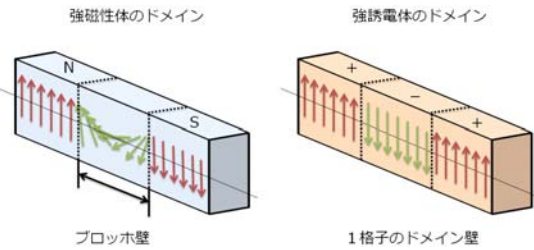


図1 強誘電体を用いた超高密度記録

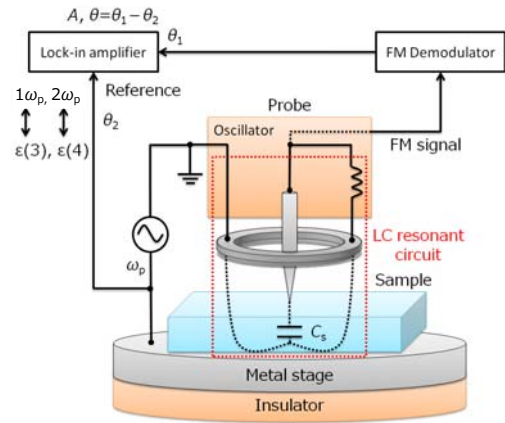


図2 走査型非線形誘電率顕微鏡(SNDM)

とするものである。エネルギーアシストを用いることで、低電界で分極反転が可能になり、探針へのダメージ低減ならびに高速パルスが容易に得られる結果として、より安定した書込・消去、さらにはより高密度かつ高速な記録が実現する可能性がある。実際、磁気記録分野では、磁化反転のエネルギーアシスト方式として、近年、マイクロ波や熱によるアシストが既に提案され、磁気記録の高密度化を阻む、いわゆる「トリレンマ」の問題を克服する可能性がある手法として期待されている。また、非線形光学分野では高効率波長変換を可能とする擬似位相整合

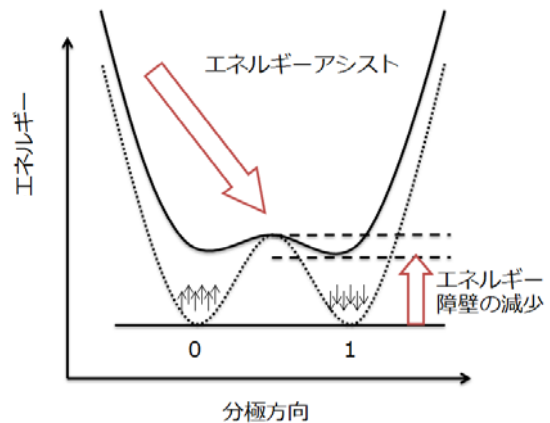


図3 エネルギーアシスト方式強誘電体記録

デバイスを実現するため、近年、マイクロメートルスケールの周期分極反転構造の作製法に関する研究が活発になされている。その中で紫外線あるいは可視光の照射が、LiNbO₃やLiTaO₃単結晶の抗電界を有意に低下させ、既存の電圧印加法による加工分解能を大きく向上させることが近年報告されており、既に光アシスト方式として活用され始めている。一方、強誘電体記録のようなナノスケールの分極反転にエネルギーアシストが適用された例は未だ存在しない。本研究では、これらの装置・成果を応用したエネルギーアシスト方式によるナノ分極反転の容易化可能性の原理的検証、その強誘電体プローブメモリの書込・消去の安定性確保、さらに高密度化、高速化への応用に向けた基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、分極反転の容易化を行うため、記録媒体にレーザ光を照射可能な SNDM のヘッドを設計・開発する。新規ヘッドを既存の SNDM 装置を組み込むことで、レーザ光照射下における分極反転実験を可能とする。

(2) 記録媒体におけるナノスケール分極反転に必要な印加電圧を系統的に調べるため、分極反転の検出に用いる非線形誘電率信号の大きさに基づいて、書き込み用印加電圧の大きさを決定するフィードバック機構を提案し、その性質に関する理論的検討を行う。

(3) 上記のフィードバック機構を内蔵したコントローラを製作する。分極反転に必要な印加電圧を系統的に調べるため、既存の SNDM に上記のコントローラを実装し、その動作検証を行う。

4. 研究成果

(1) 既存の SNDM 装置に組み込み可能なヘッドの開発した。分極反転の容易化の実証に向けて、記録媒体へのレーザ光照射が可能な SNDM のヘッドを設計・製作した。近年、原子間力顕微鏡におけるカンチレバーの光熱励振を可能とするヘッドの開発が研究されており、本研究は、これらの研究を参考としてヘッドを設計・製作した。2つの半導体レーザ (LD) を用いることで、それぞれカンチレバーの変位検出ならびに光照射に用いることができる。光照射が変位検出の影響を及ぼすことを避けるため、前者には赤色 LD (波長 635nm)、後者には青紫色 LD (波長 405nm) を用いて、光学フィルタ等を用いて波長分離が可能になるように設計した。また、光学系における光照射用レーザ光の減衰を抑制するため、使用する光学素子の最適化を行った。新規ヘッドが SNDM 装置に組み込み可能なことを確認した。

(2) 分極反転はプローブ直下の非線形誘電率

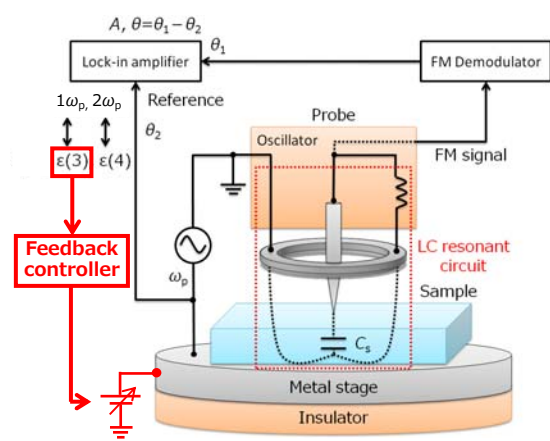


図4 SNDMにおける印加電圧のフィードバック制御

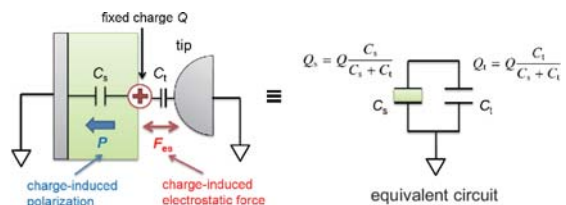
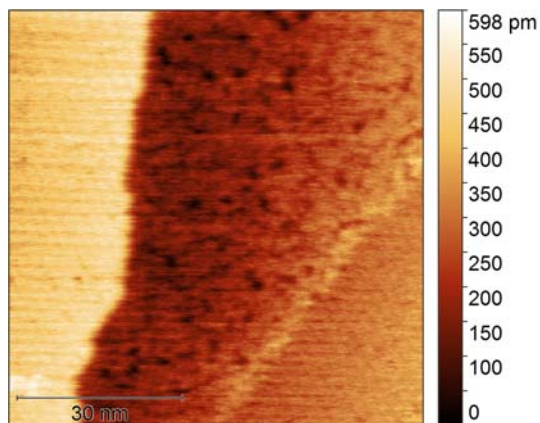


図5 補償電荷の影響

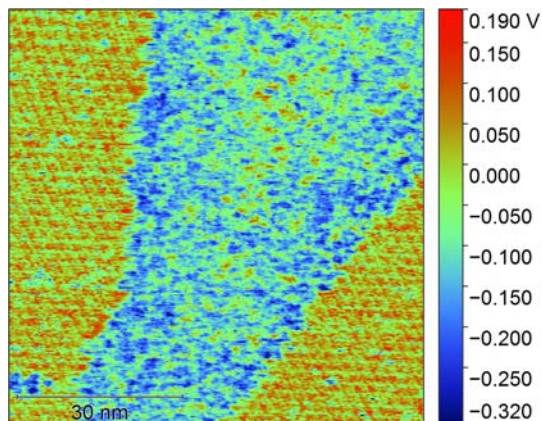
信号の符号を得ることで確認できる。本研究では非線形誘電率信号の大きさに応じて、印加電圧をフィードバック制御により調整する機構を既存の SNDM をベースに考案した。具体的には、最低次の非線形誘電率信号 (ε₃) がある指定した大きさになるまで印加電圧を増加させる (図4参照)。提案手法に関する理論的検討を行った結果、以下のような成果が得られた。提案手法は、SNDM をベースとし探針-試料表面間容量の変化を測定するため、補償電荷の影響を受けずに電圧調整が可能である。図5に示すように、誘電体表面に固定電荷が存在する場合を考える。SNDM による測定では、誘電体は試料側電極と導電性探針の間に挟まれている。このとき、固定電荷は誘電体内部および誘電体と探針のギャップ中に電界を誘起する。これらのうち、誘電体中の電界は分極を誘起するが、生じた誘起分極は見かけ上、自発分極とは区別できない。このため、補償電荷が測定に影響を及ぼす可能性がある。しかしながら、探針が試料表面に十分近づくと、誘起分極はゼロになることが示される。これは、図5の等価回路に示すように、探針が試料に近づくと、固定電荷から誘電体側を見た容量と比較して、探針側を見た容量が増加するためである。固定電荷から出る電気力線のほとんどは探針側で終端されるため、結果として、誘電体には

分極が誘起されない。大気中で強誘電体を測定する場合、補償電荷を取り除くことは困難であるが、本結果は、提案手法は補償電荷の影響を受けずに適用可能であることを意味する。なお、提案手法に類似した手法として、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KPFM) が知られている。同手法は探針-試料表面間に働く静電気力の検出に基づいており、原理的には自発分極の誘起する電位を測定することで、分極反転を検出可能である。しかしながら、既に述べたように、探針-試料表面間の電界は探針が試料表面に近づくにつれて、増加する。このため、結果として、KPFMは補償電荷の影響を受けやすいこともわかる。

(3) 提案手法に関する実験的検証を行うため、同手法を既存の SNDM に実装し、テスト試料としてシリコンを用いて表面電気二重層の測定による動作検証実験を行った。ここではフィードバック制御の目標値をゼロとすることで、表面電気二重層の誘起する電位を測定した。試料は Si (111) 清浄表面であり、形状像と同時に電位像を提案手法に基づいて得た。すなわち、 ϵ_3 信号の目標値をゼロとして、試料に印加する電圧をフィードバック制御し、操作信号から電位像を構成した。図 6



(a) 形状像



(b) 電位像 (ϵ_3 フィードバック像)

図 6 フィードバック機構の動作検証結果

に示すように、形状像と同時に電位像が得られた。SNDM を用いた先行研究から、既に Si (111) 清浄表面は正に帯電した表面電気二重層を持つことが知られている。提案手法により、表面電気二重層の誘起する電位が定量的に得られた。また、吸着物が付着した領域では、負の電位が得られた。以上の結果から、提案手法を実装した SNDM において、検出される ϵ_3 信号に基づいて、印加電圧の調整をフィードバック制御により行えることを実証した。

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

(1) Kohei Yamasue and Yasuo Cho, Dipole-induced potential measurement using noncontact scanning nonlinear dielectric microscopy, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, PP2.07, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, Dec. 1-5 (2014).

(2) Kohei Yamasue and Yasuo Cho, A new atomically resolved potentiometry for dipole-induced local surface potential based on noncontact scanning nonlinear dielectric microscopy, The European Conference on Surface Science, Antalya, Turkey, August 31- September 5, (2014).

(3) Kohei Yamasue and Y. Cho, Surface potentiometry based on scanning nonlinear dielectric microscopy, 17th International Conference on non-contact Atomic Force Microscopy, Tsukuba, Japan, August 4-8 (2014).

(4) Kohei Yamasue and Yasuo Cho, A novel method for simultaneous measurement of topography and dipole-induced local surface potential based on noncontact scanning nonlinear dielectric microscopy, 2014 International Conference on Nanoscience + Technology, Vail, Colorado, USA, July 20-25 (2014).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山末 耕平 (YAMASUE KOHEI)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号：70467455

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし