

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 17日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760245

研究課題名（和文） 次世代超高密度記録デバイスのための非線形誘電率顕微鏡による強誘電体薄膜のナノ計測

研究課題名（英文） Nanoscale measurements of ferroelectric thin films using scanning nonlinear dielectric microscopy for next-generation ultrahigh-density data storage devices

研究代表者

平永 良臣（HIRANAGA YOSHIOMI）

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：70436161

研究成果の概要（和文）：強誘電体薄膜におけるナノスケール分極反転に関する系統的な実験を通じて薄膜作製に対する設計指針を確立し、高い記録密度で記録再生を行うことが可能な強誘電体薄膜を開発することを目標とする研究を行い、次の成果を得た。（1）MOCVD法により作製したエピタキシャルLiTaO₃薄膜に対し微小分極反転ドメインの生成を行い、直径20nm程度の微小な分極反転ドットが人工的に生成可能であることを明らかにした。また、同記録媒体に対して、最高で1.6Tbit/inch²の記録密度のドメインドット列の書き込みにも成功した。（2）間欠接触SNDM法を開発し、この手法によって測定再現性が従来法に比べ格段に向上することを実証した。このことにより、強誘電体薄膜の特性評価において、従来よりも信頼性の高い分析を行うことが可能となった。（3）HDD型記録再生試験装置を用いて、記録したビットを直接高速に読みだす実験を行い、一連の記録・再生動作を連続して行うシングルトラック記録再生に、強誘電体プローブストレージ方式として初めて成功した。

研究成果の概要（英文）：Several experiments of nanoscale domain switching on ferroelectric thin films were conducted in order to develop ferroelectric thin films for high-density data storage. Major achievements of this study are as follows: (1) Artificial small nanodomain dots with the diameter of approximately 20 nm were successfully formed on an epitaxial LiTaO₃ thin film prepared by MOCVD method. A domain dot array with the density of 1.6 Tbit/inch² was also formed on the same thin film. (2) Intermittent contact scanning nonlinear dielectric microscopy (IC-SNDM) was developed for study on nanoscale domain switching on ferroelectric thin films. The reproducibility of measurements was improved in comparison to a conventional SNDM operated under contact mode. (3) Single track read/write operations were demonstrated using our HDD-type ferroelectric data storage testing system.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 2010年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2011年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：走査プローブ顕微鏡，データストレージ，誘電体物性

1. 研究開始当初の背景

近年のデジタル家電機器業界などの動向を見ても明らかなように、大量のデジタル情報を蓄積するニーズは今後ますます高まってゆくと考えられる。しかし、一方では既存の磁気記録方式の記録デバイスにおいては、今後も継続的に記録密度が向上するかどうかについては、楽観視できないという見方が強い。このため、磁気記録方式に代わる新たな記録方式を探る研究が様々な分野において行われている。中でも特に走査型プローブ顕微鏡 (SPM) を用いた記録方式、いわゆるプローブデータストレージは、探針の先鋭化技術やマイクロマシニング技術に支えられて近年めざましい発展を遂げており、今後の実用化が大きく期待されている。

申請者はこれまで、強誘電体を記録媒体とした次世代高密度記録デバイスに関する研究・開発に携わってきた。強誘電体のドメイン壁は数単位格子程度の厚さであり強磁性体のそれと比べてはるかに薄いことが知られている。一方、信号再生の原理には申請者が所属する研究グループの独自の技術である走査型非線形誘電率顕微鏡法 (SNDM) を用いている。本顕微鏡法は強誘電体分極の検出手法としては世界最高の分解能を有している。これらの状況をふまえ、強誘電体材料が実際に次世代の高密度記録媒体に適している事を実証するための様々な研究を行い、例えばタンタル酸リチウム (LiTaO_3) 単結晶を記録媒体に用いることで 4 Tbit/inch^2 程度の実データの記録が行えること、単一ドットでは最小で直径 3 nm の分極反転ドメインの生成が可能であることなどを明らかにしてきた。

但し、これまでの研究成果の多くは、単結晶という極めて理想的な材料を用いた実験において得られてきた。単結晶を記録媒体として用いるためには基板貼り合わせ、精密機械研磨、ECR ドライエッチングなど様々な工程を経て、最終的には記録層を 30 nm 程度まで薄く加工する必要がある。これらの工程をラボレベル行うことは可能であっても、実際の生産ラインで行うことは加工精度、スループット、コスト面などを鑑みると現実的な手段であるとは言い難い。したがって、スパッタ法、CVD 法などに代表されるような各種成膜法によって作製した強誘電体薄膜を導入することは、実用化にとって不可欠である。薄膜強誘電体媒体を用いた高密度記録に関する研究結果は申請者の所属する研究グループにおいてもいくつかの報告をしてきたが、これまでのところ記録密度は

640 Gbit/inch^2 にとどまり、加えて薄膜の均一性が十分でないため、部分的に書き込みに成功しているに過ぎない。さらに、今後の記録密度向上を含む、真に高密度記録媒体に適した強誘電体薄膜の設計指針は明らかとなっていない。

2. 研究の目的

本研究課題では強誘電体薄膜におけるナノスケール分極反転に関する系統的な実験を通じて薄膜作製に対する設計指針の確立を行い、高い記録密度で記録再生を行うことが可能な強誘電体薄膜を開発することを目標とする。

具体的には SNDM を用いたナノスケール分極反転の実験を様々な強誘電体薄膜に対して行い、それぞれの薄膜に対しての最小のドメインドットサイズ、ドット径の均一性、ドメイン壁厚さ、到達記録密度、ビット誤り率などを明らかにする。また、一般的に用いられる物性評価手法であるヒステリシス計測や X 線回折装置 (XRD) を用いた結晶性評価などを併せて行い、これらの測定結果とナノスケールでの分極反転の実験結果との対応関係を調べる。これらの実験を通じて、ナノスケールの分極反転特性とプロセス条件との関係を明らかにし、高密度記録に適した強誘電体記録媒体の開発の手掛かりを探る。

3. 研究の方法

(1) PZT 薄膜, LiTaO_3 薄膜におけるナノスケール分極反転

SNDM を用いて強誘電体薄膜におけるナノドットの書き込みとその評価を行う。強誘電体薄膜としてはチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) 薄膜、およびタンタル酸リチウム (LiTaO_3) 薄膜を用いる。

PZT 薄膜は最も代表的な強誘電体薄膜の一つであり、薄膜作製の手法や、得られた薄膜の諸特性に関して、きわめて多くの報告がこれまでになされてきている。

一方、 LiTaO_3 も代表的な強誘電体の一つであるが、これについては単結晶媒体でのナノスケール分極反転に関する研究において、既に 4 Tbit/inch^2 の記録に成功していることから、もし仮に薄膜媒体においても単結晶と同程度までに品質を高める事ができれば、極めて高い記録密度が実現できることが期待される。

(2) 間欠接触 SNDM の開発とこれを用いた薄膜計測

分極反転に関する実験は従来の SNDM に加え、間欠接触 SNDM の開発を行い、これを使用することも検討する。従来の SNDM 法では特殊な場合を除き、主に探針を測定対象に接触させた状態で計測を行ってきた。このため、測定を繰り返すことによって探針先端の摩耗が生じ、結果として測定値にばらつきが出るといった問題を有していた。これに対し間欠接触 SNDM ではその名の通り間欠的に探針と測定対象を接触させながら測定を行うため、探針の摩耗を抑え、測定値のばらつきを大幅に低減することができる。

(3) HDD 型強誘電体記録システムを用いた記録再生特性評価

製品段階の強誘電体記録デバイスについては、デバイス構成に対していくつかの提案がなされている。(マルチプローブ方式、回転ディスク方式、圧電応答を用いた再生、SNDM 法による再生など)。これに関して申請者は回転ディスク方式 (HDD 型) の記録再生システムの試験装置を開発してきた。そこで、上記(1)の結果得られた高品質な記録媒体を HDD 型強誘電体に搭載し、各種記録再生特性の評価を行う。

4. 研究成果

(1) LiTaO_3 薄膜におけるナノスケール分極反転

MOCVD 法により作製したエピタキシャル LiTaO_3 薄膜上に SNDM 強誘電体ドメインエンジニアリングシステムを用いて微小分極反転ドメインを生成し、印加パルス電圧と分極反転ドットサイズの関係を明らかにした。その結果、直径 20 nm 程度の微小な分極反転ドットが人工的に生成可能であることが分かった。また、多数の分極反転ドットからなる最密格子パターンの書き込みを行い、最高で 1.6 Tbit/inch^2 の記録密度における書き込み成功した。(図 1)

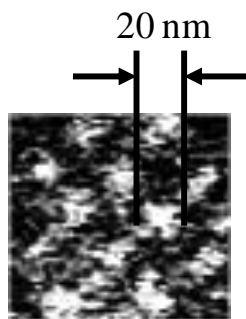


図 1 エピタキシャル LiTaO_3 薄膜上に生成した分極反転ドメインドット列

これまでの強誘電体記録に関する基礎研究で用いられてきた単結晶記録媒体は、大面積で均一な厚さを有する媒体を安価かつ大量に生産することが困難とされてきたが、本研究成果は生産性の面においてより実用化に近い薄膜記録媒体において、磁気記録方式をはじめとする現行の他の記録方式を凌駕する記録密度を実現できる可能性を見出したことを示している。

(2) 間欠接触 SNDM の開発とこれを用いた薄膜計測

測定を繰り返すことによって探針先端の摩耗が生じるといった、従来の接触式の SNDM が有していた問題点を打開する新たな測定法として、間欠接触 SNDM 法を開発した。

(図 2) 間欠接触 SNDM 法を用いることにより測定再現性が従来法に比べ格段に向上することを実証した。このことにより、強誘電体薄膜の特性評価において、従来よりも信頼性の高い分析を行うことが可能となった。

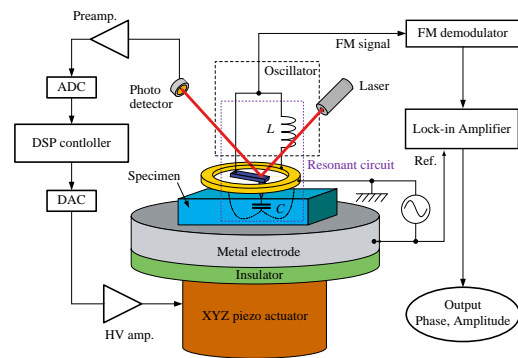


図 2 間欠接触 SNDM のブロックダイアグラム

(3) HDD 型強誘電体記録方式におけるシングルトラック記録再生

従来の HDD 型強誘電体記録再生試験装置を用いた記録再生速度に関する実験では、記録実験と再生実験が完全に独立しており、記録したビットを直接高速に読み出すといった実験は行われていなかったが、今回初めてこれに着手し、一定の成果が得られた。具体的には、強誘電体記録媒体として単結晶 LiTaO_3 を使い、これを回転させながら書き込み用プローブを介して 2ms 周期のパルス波を媒体に印加し、書き込みを行った。次に、回転をそのまま継続させた状態でビットの読み出しを行ったところ、2ms 周期の再生波形を得ることができた。これにより、HDD 型強誘電体記録再生試験装置を用いた実験としては初めて、一連の記録・再生動作を連続して行うことに成功した。また、エピタキシャル薄膜

LiTaO₃ 媒体を用いた実験においても同様の結果が得られることも確認した。

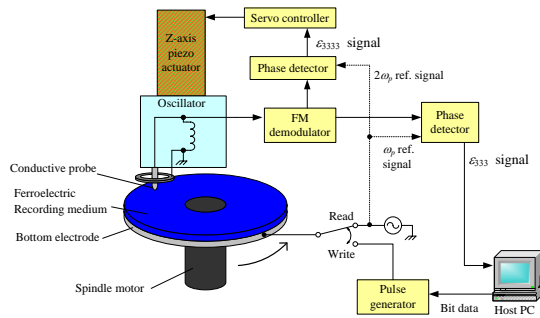
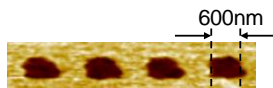


図3 HDD型強誘電体記録再生試験装置のブロックダイアグラム

(a) 記録したビット列のSNDM像



(b) リアルタイム再生波形

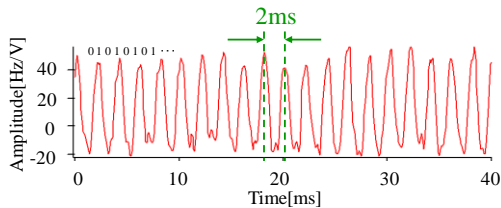


図4 HDD型強誘電体記録再生試験装置を用いて読み出した強誘電体記録のビット列

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1件)

- ① Yoshiomi Hiranaga and Yasuo Cho, "Intermittent contact scanning nonlinear dielectric microscopy", Rev. Sci. Instrum., 査読有, Vol. 81, No. 2, 2010, pp. 023705-1-023705-5.

[学会発表] (計7件)

- ① 平永良臣, 長康雄, 強誘電体ドメインのナノスケール選択エッチング, 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011年3月26日, 神奈川工科大学
- ② 木本康宏, 平永良臣, 長康雄, 強誘電体回転ディスク記録方式におけるシングルトラック記録・再生, 第58回応用物

理学関係連合講演会, 2011年3月26日, 神奈川工科大学

- ③ 隅山直樹, 平永良臣, 長康雄, 強誘電体ディスクリーク記録媒体に関する基礎的研究, 第58回応用物理学関係連合講演会, 2011年3月26日, 神奈川工科大学
- ④ Yasuo Cho, Kenkou Tanaka, and Yoshiomi Hiranaga, Ferroelectric Super-High Density Data Storage Based on Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy, The 3rd International Symposium on Innovations in Advanced Materials for Optics & Electronics, 2010年10月18日, 富山
- ⑤ 平永良臣, 卯田知也, 栗橋悠一, 長康雄, 門田道雄, 柄下光, 強誘電ナノ分極反転とHDD型強誘電体記録デバイスの開発, 第26回強誘電体応用会議, 2009年5月30日, 京都
- ⑥ Yoshiomi Hiranaga, Tomoya Uda, Yuichi Kurihashi, Yasuo Cho, Michio Kadota and Hikari Tochisita, Nano-Domain Formation on Ferroelectrics and Development of HDD-Type Ferroelectric Data Storage Test System, 21st International Symposium on Integrated Ferroelectrics and Functionalities, 2009年9月29日, コロラドスプリングス
- ⑦ Y. Hiranaga, K. Tanaka, T. Uda, Y. Kurihashi, Y. Kimoto, H. Tochishita, M. Kadota, Y. Cho, Development of Ferroelectric Data Storage Test System for High-Density and High-Speed Read/Write, 2009 MRS fall meeting, 2009年12月3日, ボストン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平永 良臣 (HIRANAGA YOSHIOMI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 70436161