

機関番号：11301  
 研究種目：特別推進研究  
 研究期間：2006～2010  
 課題番号：18002005  
 研究課題名（和文）非線形誘電率顕微鏡を用いた次世代超高密度強誘電体記録  
 研究課題名（英文）Next Generation Super High Density Ferroelectric Data Storage Using Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy Technique

研究代表者  
 長 康雄 (YASUO CHO)  
 東北大学・電気通信研究所・教授  
 研究者番号：40179966

研究成果の概要（和文）：次世代超高密度強誘電体記録に関する研究を行い、世界最小の2.8 nm  $\phi$ の単一ドメインドットの生成に成功した。また直径7nmの一次元ナノドメインドットアレイの形成及び15 nm  $\phi$ のドメインドット列の生成・消去実験にも成功した。更に多数の記録ビットからなる実情報（画像情報）記録に於いて強誘電体記録では世界最高の4Tbit/inch<sup>2</sup>の記録密度を達成した。そしてハードディスクドライブ型シングルプローブメモリを用いて、書き込み速度に関しては20 Mbpsの高速性を実証した。

研究成果の概要（英文）：We had made a study on next generation high density ferroelectric data storage based on scanning nonlinear dielectric microscopy. We have succeeded in forming world smallest ferroelectric single nano-domain dot with the size of 2.8nm in diameter. Also, we had achieved the memory density of 4Tbit/inch<sup>2</sup> in actual information recording which requires an abundance of bits to be packed together.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	133,200,000	39,960,000	173,160,000
2007年度	97,700,000	29,310,000	127,010,000
2008年度	79,900,000	23,970,000	103,870,000
2009年度	79,900,000	23,970,000	103,870,000
2010年度	44,400,000	13,320,000	57,720,000
総計	435,100,000	130,530,000	565,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：高密度記録，強誘電体，走査型非線形誘電率顕微鏡，分極ドメイン

## 1. 研究開始当初の背景

近年、情報量の増大から大量に高速に情報を蓄積する技術への要求が高まっている。現在最も広く使用されている磁気記録の記録密度は理論限界に近づきつつあり、垂直磁気記録を用いても1Tbit/inch<sup>2</sup>の記録密度を達

成するのは長い時間がかかると言われていた。一方強誘電体の分域壁は1，2単位格子程度で強磁性体のそれより格段に薄いことはよく知られており、そのドメインサイズも強磁性体のドメインサイズよりはるかに小さい。よって、この強誘電体の極微細なドメ

インを人工的に制御できれば今までにはなかった超高密度情報記録素子が得られると考えられる。

しかし、永久磁石はあるが永久電石が存在しないように、強誘電材料中の永久分極は、表面電荷により遮蔽されるため、単なる純電気的手法では観測できなかった。これが、磁気記録は存在するのに実用的な強誘電体記録が存在しなかった大きな理由である。一方本研究者は、強誘電材料の分極分布がサブナノメートルの分解能で観測できる「走査型非線形誘電率顕微鏡」(SNDM)を開発した。この顕微鏡は他の如何なる方法より強誘電体のドメインを高分解能に計測できる。これに加えて更に最近極薄単結晶強誘電体記録媒体の開発をおこない、まだ基礎的段階であるがSNDMのプローブを記録再生のピックアップに用いて単一のドメインドットで直径5nm(約25Tbit/inch<sup>2</sup>の記録密度に相当)のナノドメインを作製することに成功し、ドメイン反転時間でも最高500psecを観測している。更にこれらの基礎データに加え、多数のデータから成る実情報記録に於いても1Tbit/inch<sup>2</sup>を達成していた。

## 2. 研究の目的

本研究では総て純国産の走査型非線形誘電率顕微鏡を用いた次世代超高密度強誘電体記録技術の基礎から応用までを更に飛躍的に発展させるべく、SNDM強誘電体プローブメモリ技術、薄片化単結晶記録媒体作製技術、均質な強誘電体薄膜作製技術を研究開発の核にして、人工的に作製可能で物理的に安定な最小の強誘電ナノドメインドットの大きさや強誘電性の消失する限界の試料厚の調査、スイッチングスピードの詳細な計測や強誘電体のドメイン壁の実測などの基礎的研究を行い、これらの結果と新開発の非接触SNDM法等のプローブメモリ技術の諸問題点を根本から解決できる多数のSNDM関連技術を組み合わせ、実用化技術として発展させることを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 薄片化単結晶媒体の大面積化を達成する。
- (2) ナノドメインマニピュレーション用SNDMの開発を行う。
- (3) ナノドメインの生成と評価を行い、最小ドメインの大きさや最高記録密度の記録更新、更にはナノドメインの長期安定性の評価を行う。
- (4) 超高密度記録媒体用強誘電体薄膜の研究を行い、強誘電体薄膜においてもTbit/inch<sup>2</sup>級の記録が可能なることを証明する。

(5) 高速読み取りを目指したSNDM復調器の広帯域化・高感度化を図る。

(6) 非接触SNDM法を用いた非接触型SNDMヘッドの開発を行い、プローブストレージが持つ記録再生用探針の摩耗の問題を解決する。

(7) 超高密度記録に対応できるハードディスクドライブ型(HDD)シングルプローブメモリの開発。超高密度大容量記録と高速書込み・読出しの同時達成を行う。

(8) 強誘電体記録で必須のナノスケールの記録ビットを正確に書込読み取るのに必要不可欠な技術であるサーボトラッキング法の開発を行う。

(9) 媒体加工技術・及び書込読み取りの連続動作に関する研究開発を行う。具体的には長寿命の記録保持特性が予想される、強誘電体ディスクリット記録媒体を開発し更には回転ディスク型強誘電体記録装置で書込と読み取りの一連の動作を連続して行う実験を行う。

## 4. 研究成果

(1) 薄片化単結晶媒体の大面積化においては15mm<sup>2</sup>の面積を持ち厚さ平均48.5nm分布3.1nmの媒体が得られた。

(2) ナノドメインマニピュレーション用SNDMの開発においては、サブナノメートルの繰返し精度でピンポイントに媒体の特定部を狙う、ドメインマニピュレーションを正確に行うのに十分な位置決め精度があるSNDM装置の開発に成功した。位置補正無しで0.18nm/分のドリフトに抑えられた基本性能を持つことが確認された。更に新開発のマーク検出によるドリフト補正機能を作動させると、有意な位置ずれは検出されなかった。

(3) ナノドメインの生成と評価では、世界最小の2.8nmφの単一ドメインドット(図1)の生成に成功した。また直径7nmの一次元ナノドメインドットアレイの形成(図2)及び15nmφのドメインドット列の生成・消去実験にも成功している(図3)。更に多数の記録ビットからなる実情報(画像情報)記録に置いて強誘電体記録では世界最高の4Tbit/inch<sup>2</sup>(12.8nmφ)の記録密度を達成した(図4)。

またナノドメインの長期安定性の評価に関する研究を行い、ドメインの寿命予測が行える実験式の定式化に成功した。

(4) 超高密度記録媒体用強誘電体薄膜の研究開発においては、特にLiTaO<sub>3</sub>系薄膜とPZT系薄膜について研究を行い、それぞれ、1Tbit/inch<sup>2</sup>を超える密度での記録が可能であることを証明した。

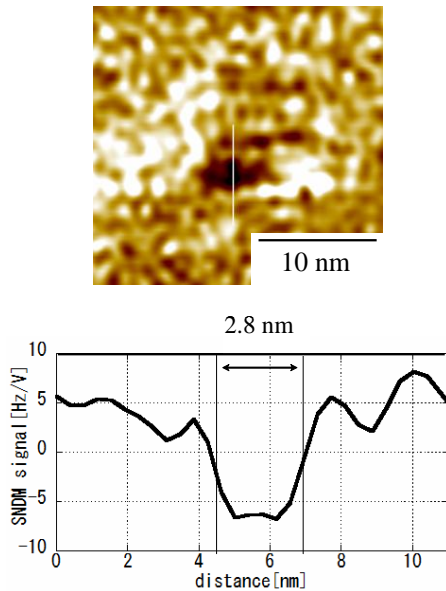


図1. 最小の強誘電単一ナノドメインドット。

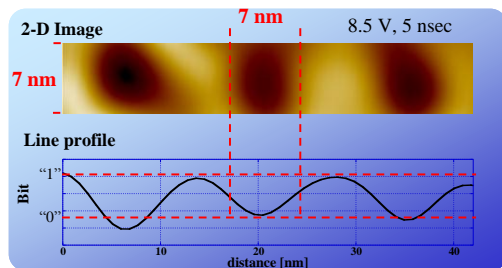


図2. 直径 7nm の一次元ナノドメインドットアレイ。

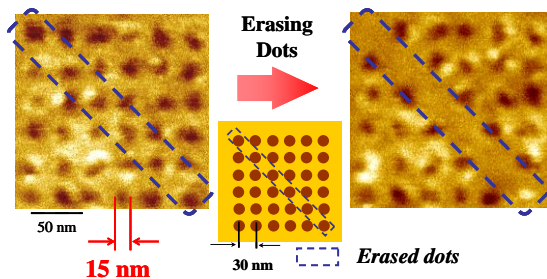


図3. 15 nmφのドメインドット列の生成・消去実験。

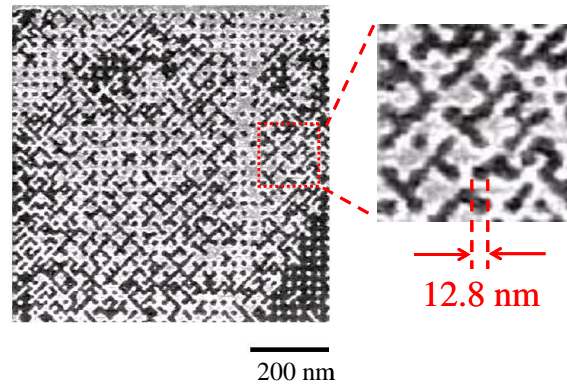


図4. 4 Tbit/inch<sup>2</sup> の記録密度を持つ強誘電体実情報データ記録。

(5) 高速読み取りを目指したSNDM復調器の広帯域化・高感度化においては、10<sup>-23</sup>F代の感度を持つプローブの開発を行い更に帯域30MHzの復調器の開発に成功した。

(6) 非接触SNDM法を用いた非接触型SNDMヘッドの開発においてはアクティブに空隙を制御しながら分極を書込読み取りに成功した。具体的には非接触状態での書込でGap1.5nmの制御に成功し、ビット間距離50nmの記録を行った。更に非接触で記録速度500bps、再生速度100kbpsを達成した。

(7) 超高密度記録に対応できるHDDシングルプローブメモリの開発。超高密度大容量記録と高速書込み・読出しの同時達成を目標に、高精度なHDDシングルプローブメモリの装置開発においては、現在HDD型シングルプローブメモリを用いて、書き込み速度に関しては20Mbpsの高速性を実証した。またまだ多数の記録誤りはあるものの、100Mbpsの高速転送レートに置いても一部の記録に成功した。また同様にHDD型再生装置に置いて2Mbpsの速さの再生に成功した。この速度はシングルプローブを用いたプローブストレージ方式では群を抜いて高速なものである。

(8) 強誘電体記録の研究に於いてはナノスケールの記録ビットを正確に書込読み取るのに必要不可欠な技術であるサーボトラックング法の開発を行った。

具体的には、データの記録再生を行う前に、サーボ領域内で一致溶解組成LiTaO<sub>3</sub>記録媒体にサーボマークとして部分的に分極を反転させ、周期分極構造を作製した。次に、このライン状のサーボマークを基準として、SNDMからの出力が0Hz/Vになるような自動制御を行いながら64×64点からなる実デ

ータの記録再生を行った。これを言い換えると記録再生ヘッドにサーボマーク(周期分極構造)のドメインバンドリ上を走査させるという制御方法である。このとき補償回路は動的PID法を応用して構成した。ビット間距離は 25.6 nm であり、密度に換算して 1 Tbit/inch<sup>2</sup> のデータ記録である。

直径が 20 nm 程度という微小なドットであるにも関わらず記録再生ヘッドがトラック列中央を走査し、所望の機能を果たしていることが確認された。このとき、書き込んだビット総数とビット誤りを起こしたビット数から算出されるビットエラーレートは、 $1.7 \times 10^{-3}$  と算出された。

次に制御信号と目標値の差分で表されるエラー信号の評価を行った。実験で用いたデータ記録再生システムには S NDM に重畳するノイズが存在するため、サーボ信号は必ずしも 0 V にはならないものの、時間を十分とると、0 V に漸近していくことが分かった。さらにサーボラインのラインプロファイルを参考にヘッドの位置精度を求めた。ノイズが存在するため正確な精度は不明であるが、大きく見積もったとしても目的位置に対して 2 nm<sub>pp</sub> 程度の精度でヘッド位置を制御することが可能であるという結果を得た

(9) 強誘電体ディスクリット記録媒体の研究並びに回転ディスク型強誘電体記録装置で書込と読み取りの一連の動作を連続して行う実験をおこなった。

まず強誘電体ディスクリット記録媒体についてであるが、ディスクリット媒体に記録することにより、データをより長期間保存できると考え、集束イオンビームを用い、薄片化した LiTaO<sub>3</sub> 単結晶上にトラック幅 30 nm のディスクリット媒体を作製することに成功した。次に、ディスクリット媒体へのデータ記録を行った。その結果ビット間隔 18 nm、線記録密度に換算して 1.41 M bit/inch という高い線密度によるデータ記録を達成した。

更に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・再生においては、最初に記録媒体として LiTaO<sub>3</sub> 単結晶を用いた。まず、媒体を 1rpm で回転させた状態で導電性ダイヤモンドコートカンチレバーを電極として接触させ、2ms 周期のパルス電圧を記録媒体に印加することで分極を反転させ、ビット列を記録した。次にその媒体を回転させたまま連続して、書き込んだビット列の読み出しを行った。取得した再生信号は 2ms 周期の信号波形であり、記録したビット列を正しく再生していることを確認した。このように、強誘電体記録方式において記録媒体を回転させたまま一連の記録再生動作を行うことに初めて成功した。この時、記録再生速度は

1kpbs であり、12.9dB という高品質な SN 比での再生であった。更に記録媒体として LiTaO<sub>3</sub> 薄膜を用いた実験も行い、連続した記録再生実験において実際に記録したビット列を正しく再生することに成功した。また、単結晶と比べて遜色ない SN 比での再生に成功した。

#### 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 4 3 件)

1. K. Tanaka and Y. Cho, "Ferroelectric Data Recording Using Servo-Controlled Tracking Technique" Jpn. J. Appl. Phys, 査読有, Vol. 49, (2010) p. 09MA16.
2. K. Tanaka and Y. Cho, "Actual information storage with a recording density of 4 Tbit/in.<sup>2</sup> in a ferroelectric recording medium" Appl. Phys. Lett, 査読有, Vol. 97 (2010) p. 092901.
3. N. Odagawa and Y. Cho, "Dependence of long term stability on the initial radius of small inverted domains formed on congruent single-crystal LiTaO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett, 査読有, Vol. 95, (2009) p. 142907.
4. Y. Hiranaga, T. Uda, Y. Kurihashi, H. Tochishita, M. Kadota and Y. Cho, "Nanodomain Formation on Ferroelectrics and Development of Hard-Disk-Drive-Type Ferroelectric Data Storage Devices", Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, Vol. 48, (2009) p. 09KA18.
5. K. TANAKA, Y. KURIHASHI, T. UDA, Y. DAIMON, N. ODAGAWA, R. HIROSE, Y. HIRANAGA, and Y. CHO, "Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy Nano-Science and Technology for Next Generation High Density Ferroelectric Data Storage", Jpn. J. Appl. Phys, 査読有, Vol. 47, (2008), p. 3311. 【Invited Review Paper】
6. Y. Hiranaga, T. Uda, Y. Kurihashi, K. Tanaka, and Y. Cho: "Novel HDD-type S NDM Ferroelectric Data Storage System Aimed at High-Speed Data Transfer with Single Probe Operation", IEEE TRANSACTION ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, 査読有, Vol. 54,

(2007), P.2523.

7. Y. Cho and R. Hirose, “Atomic Dipole Moment Distribution of Si Atoms on a Si(111)-(7×7) Surface Studied Using Noncontact Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy”, Physical Review Letters, 査読有, Vol. 99, (2007), p.186101.

[学会発表] (計 131件)

1. Y. Cho, “Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy”, 2010 MRS Fall Meeting, 2010年12月1日, Boston, 【Invited】
2. Y. Cho, K. Tanaka, and Y. Hiranaga, “Ferroelectric Super-High Density Data Storage Based on Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy”, The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Innovations in Advanced Materials for Optics & Electronics, 2010年10月18日, Toyama, 【Invited】
3. Y. Cho, Y. Hiranaga, K. Tanaka, Y. Kurihashi, and T. Uda, “Next Generation Ferroelectric high Density Data Storage Based on Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy”, The 2nd IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference, 2008年10月21日, Kyoto, 【Invited】
4. Y. Cho, R. Hirose, S. Kobayashi and N. Kin; “Scanning nonlinear dielectric microscopy with super high resolution”, 第27回電子材料シンポジウム, 2008年7月9日, 伊豆市, 【Invited】
5. Y. Cho, K. Tanaka, Y. Kurihashi, T. Uda, Y. Daimon, N. Odagawa, R. Hirose and Y. Hiranaga; “Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy Nano Science and Technology for Next Generation High Density Ferroelectric Data Storage”, 20<sup>th</sup> International Symposium on Integrated Ferroelectrics, 2008年6月10日, Singapore, 【Invited】
6. Y. Cho; “Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy Nanoscience and Technology for Next Generation High Density Ferroelectric Data Storage”, 2008 MRS Spring Meeting, 2008年3月24日, San Francisco, 【Tutorial】

7. L. Tian, S. Kalinin, E. Eliseev, A.

Mozorovska, N. Odagawa, Y. Cho and V. Gopalan: “Nanoscale Structure of a Ferroelectric Domain Wall using Scanning Probe Microscopy”, 2007 MRS Fall Meeting, 2007年11月28日, Boston, 【Invited】

8. Y. Cho “Scanning nonlinear dielectric microscopy with atomic resolution”, 13<sup>th</sup> US-Japan Seminar on Dielectric and Piezoelectric Ceramics, 2007年11月4日, Awaji Island, 【Plenary Talk】
9. Y. Cho, Y. Hiranaga, K. Tanaka, N. Odagawa, T. Uda, Y. Kurihashi: “Recent progress on ultra high density SNDM ferroelectric probe memory”, Materials Today Asia, 2007年9月3日, Beijing, 【Invited】

[産業財産権]

○ 取得状況 (計 29件)

名称: 強誘電体薄膜製造方法、電圧印加エッチング装置、強誘電体結晶薄膜基板及び強誘電体結晶ウエハ

発明者: 長康雄, 尾上篤

権利者: 長康雄, パイオニア株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 4641943 号

取得年月日: 2010年12月10日

国内外の別: 国内

名称: DATA RECORDING/REPRODUCING APPARATUS AND METHOD USING NEEDLE-SHAPED MEMBER

発明者: Yasuo Cho, Atsushi Onoe

権利者: Yasuo Cho, Pioneer Corporation

種類: U.S. Patent

番号: US 7,385,901 B2

取得年月日: 2008年6月10日

国内外の別: 国外

名称: 誘電体記録再生ヘッド及び誘電体記録再生装置

発明者: 長康雄, 尾上篤

権利者: 長康雄, パイオニア株式会社

種類: 特許

番号: 特許第 3968196 号

取得年月日: 2007年5月18日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.d-nanodev.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長 康雄 (CHO YASUO)  
東北大学・電気通信研究所・教授  
研究者番号：40179966

(2) 研究分担者

廣瀬 龍介 (HIROSE RYUSUKE)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号：60422143

(3) 研究分担者

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

(4) 研究分担者

金 暢大 (KIN NOBUHIRO)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号：80418269

(5) 研究分担者

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