

SNDM 強誘電体プローブメモリによる超高密度デジタルデータ記録再生

Ultra high-density digital data storage by SNDM ferroelectric probe memory

藤本 健二郎, 高橋 宏和, 前田 孝則, 尾上 篤

Kenjiro Fujimoto, Hirokazu Takahashi, Takanori Maeda, Atsushi Onoe

要 旨 磁気記録を超える新しい大容量ストレージとなりうる強誘電体プローブメモリを実現するために、実際のデジタルデータ記録再生に近い形での記録再生実験、耐久性に優れた導電性ダイヤモンドプローブの試作・評価を行った。

まず、走査型非線形誘電率顕微鏡の原理を利用した強誘電体記録再生装置を用いて、一致溶融組成 LiTaO_3 単結晶記録媒体へ、()DVD と同様な記録方式、()高密度記録に適したマトリクス方式、の2方式によるデジタルデータの記録再生実験を行い、良好なデジタルデータの高密度記録再生が可能であることを示した。

次に、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いて導電性ダイヤモンドをチップとするプローブを試作し、このプローブを用いて強誘電体の分極分布の測定、強誘電体への情報の記録再生実験を行い、このプローブが強誘電体プローブメモリのプローブとして利用可能であることを示した。

Summary Ferroelectric probe memory is expected as a candidate of next generation huge-capacity digital data storage system. In this paper we report quasi-digital data recording experiments to evaluate the realization of real data storage system. We also report the fabrication trial and evaluation of durable electro-conductive diamond probe head. Firstly, ferroelectric read/write experiments using congruent LiTaO_3 single crystal media were performed using two different signal patterns. One was a pseudo DVD signal and the other was a dot-matrix signal which is suitable for higher density recording. The ferroelectric reproduction technique used in our experiments was based on the scanning nonlinear dielectric microscope (SNDM) technique. Secondly, Electro-conductive diamond probes were fabricated using micro electro mechanical systems (MEMS) processes. We confirmed that this probe could be used as a probe for the ferroelectric probe memory by actually doing record reproduction to the ferroelectric medium with it.

キーワード : 強誘電体記録, プローブメモリ, 走査型非線形誘電率顕微鏡法, 一致溶融組成 LiTaO_3

1. まえがき
情報通信技術の目覚ましい発展とともに、情報の大容量化が進み、より高密度・大容量の記録が必要となってきた。しかし、現在広く用いられている磁気記録の記録密度は近い将来の論限界に達すると考えられている。そこで、よ

り高密度な記録が可能であると考えられる強誘電体記録⁽¹⁾が次世代の高密度記録方式として注目されている。また、そのような超高密度記録において高速アクセス - 高速データ転送が可能なプローブメモリ⁽²⁾が盛んに研究されている。

強誘電体は自発分極をもち、その分極は外部から電界を印加することにより反転させることができる。強誘電体記録はデジタルデータをこの分極の向きに対応させて情報を記録する。また、強誘電体の分極壁の厚みは数格子層程度(約1nm)と考えられ、これは磁性体のそれに比べて非常に薄く、超高密度記録に適していることは以前から知られていた。しかし、強誘電体の分極はその表面では、外部からのイオンなどの荷電粒子にシールドされ、これを測定すること、つまり記録された情報を読み出すことは困難である。このためにこれまで強誘電体高密度記録は実現されていなかった。

このような背景の中、我々は強誘電体の分極分布を純電氣的に高分解能で測定可能な走査型非線形誘電率顕微鏡(Scanning Nonlinear Dielectric Microscopy; SNDM)⁽¹⁾の技術に着目し、これを再生法として応用した強誘電体プローブメモリの開発を行っており、これまでに、この方式により1Tbit/inch²超の高密度記録が可能であることを実験的に示されている⁽³⁾。本稿で

はこれを発展させ、初めて実際のデジタルデータの記録再生実験を行ったので報告する。

また、この強誘電体プローブメモリは接触方式であるためにこれまでプローブ先端の磨耗が懸念されていたが、この問題を解決するためにMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)⁽⁴⁾技術を用いて、ひずみセンサを内蔵した導電性ダイヤモンドプローブを試作し、これを用いて強誘電体記録媒体への記録再生実験を行った。

2. 記録再生装置

図1にSNDMを応用した強誘電体記録再生実験装置のシステムダイアグラムを示す。プローブ直下の静電容量 C_s とそれに並列に設置されたインダクタンス L によりLC共振回路を構成している。これに媒体の裏面電極側から数10kHz程度の低周波電界を印加すると強誘電体媒体の非線形誘電効果により C_s が変化し、その変化が発振周波数の変化(FM波に変換)となる。この容量変化分 ΔC_s の静電容量 C_{s0} に対する比は式(1)で表される。

$$\frac{\Delta C_s}{C_{s0}} = \frac{\varepsilon(3)}{\varepsilon(2)} E_p \cos(\omega_p t) + \frac{1}{4} \frac{\varepsilon(4)}{\varepsilon(2)} E_p^2 \cos(2\omega_p t) + \left(\frac{1}{24}\right) \frac{\varepsilon(5)}{\varepsilon(2)} E_p^3 \cos(3\omega_p t) + \dots \quad (1)$$

ここで(2)は線形の誘電率、(3)、(4)、(5)はそれぞれ2次、3次、4次の非線形誘電率

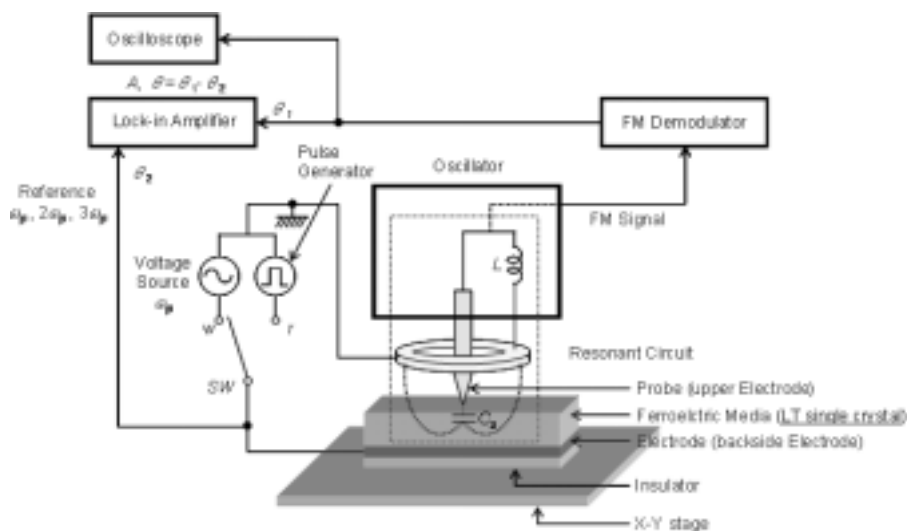


図1 SNDM 強誘電体記録再生実験装置

(括弧内の数字はテンソルの階数)である。ここで奇数階の非線形誘電率は分極の向きによりその符号が異なるため、式(1)より、印加電界と同じ周波数成分(3)を係数に含む項を検出することにより分極の向きに対応する信号が得られる。実際には上述のFM変調された信号を復調、ロックインアンプを用いて同期検波することによりこれを行う。

記録時にはプローブ-裏面電極間へ電圧パルスを印加することによりプローブ直下の微小領域の分極反転を行う。

ステージは piezoelectric actuator を用いた X-Y-Z 軸ステージでストロークは 100 μm である。また、静電容量位置センサを用い、クローズドループ制御を行い、ナノメートルオーダーの精度で制御することができる。

プローブはシリコン(Si)のチップを白金イリジウム(Pt-Ir)でコートした先端半径 25nm のプローブを用いた。

3. 強誘電体記録媒体

一致溶融組成 LiTaO₃ (CLT) 単結晶は、

1. 面に対して垂直方向の分極しか持たない。
2. 室温で分極が安定する。
3. ヒステリシス曲線の角型性が良い。
4. 結晶が安価である。

などの記録媒体として適した多くの特性を有している。

実際の記録媒体としては、低電圧駆動・高速・

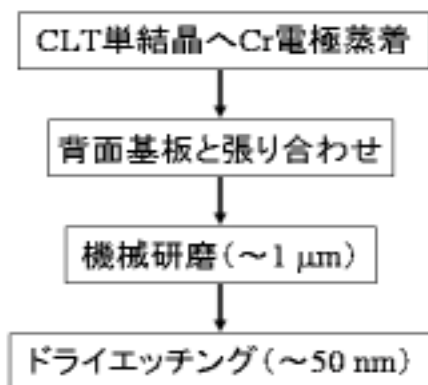


図2 CLT 単結晶記録媒体作製プロセス

高密度記録を可能にするためにこの結晶を厚さ 100nm 以下にまで薄く加工する必要がある。図2にCLT単結晶記録媒体の作製プロセスを示す。まずCLT単結晶ウェハ(3inch, 500 μm)に下部電極としてクロム(Cr)を蒸着し、SiまたはCLTの基板に貼り付ける。次に機械研磨により厚さ 1 μm 程度まで研磨し、最後に Ar と O₂ の混合ガスによるドライエッチングにより目的の厚さ(50nm程度)に仕上げる。

4. 書き込み条件検討

図3は3章で作製したCLT単結晶記録媒体へ2章で述べた強誘電体記録再生実験装置を用いて、電圧を左から 6V, 7V, 8V, 9V, 10V, 印加時間を上段から 100ns, 1 μs, 10 μs, 100 μs, 1ms と変えて 5 行 × 5 列のパルスを印加した後、SNDMにより分極分布を測定した結果である。図中の暗い領域は分極が上向きのドメイン、明るい領域は下向きのドメインを示している。

この結果からパルス電圧が小さく、印加時間が短いほど微小なドットの見込みができ、パルスの条件によって直径 20nm 程度の微小なドットの見込み、1bit あたり 100ns という高速な記録も可能であることが分かる。

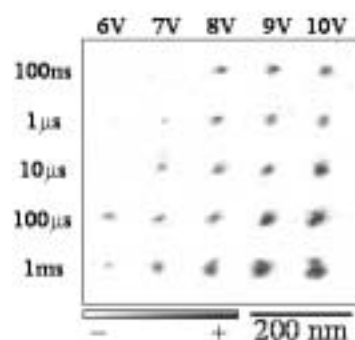


図3 CLT 単結晶記録媒体へ 6V ~ 10V, 100ns ~ 1ms のパルスを印加して反転させたドメインの SNDM 像

5. デジタル記録再生

これまでは上述したように電圧パルスを用いて微小ドメインの反転を行い、その後に SNDM

を用いて分析的に分極分布を観測することにより強誘電体記録媒体の反転特性を調べ、高密度記録の可能性を評価してきた。

本実験では、これらのデータを元にして、SNDM 記録再生装置を用いてプローブを走査しながらデジタルデータの記録を行い、その後同記録トラック上をスキャンし、データを再生するという、より実際のデジタルデータ記録再生に近い形の実験を行った。記録用のデジタル信号としては、DVD などで行われている、EFMplus (Eight to Fourteen Modulation plus)方式で変調した信号を用いた。図4 は記録用の原信号であり、EFMplus 変調された擬似デジタル信号と、そのトラック間に「Pioneer 総合研究所高機能デバイス研究部」という文字を重ね合わせたものである。この現信号を、厚さ 50nm の CLT 単結晶記録媒体の $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ の領域に、線記録密度 726kbp*i*、トラックピッチ 70nm で、10V、10 μs のパルス列を用いて書き込み、その後書き込み時と同じようにトラック上を1度だけスキャンし、データの再生を行った結果を図5(a)に示す。また、図5(b)は図5(a)の一部を拡大したものである。このように記録した信号を良好に再生することに成功した。

上述の実験では DVD の記録方式を模し、EFMplus 変調を用い、十分なトラックピッチを取って記録を行ったが実際の強誘電体記録ではトラックピッチを最小記録ピットと同じ大きさまで詰めることが可能である。これは

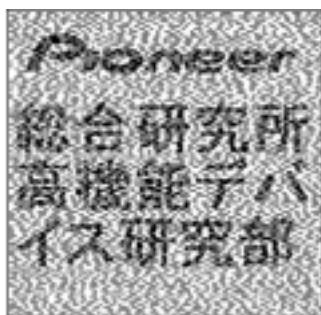
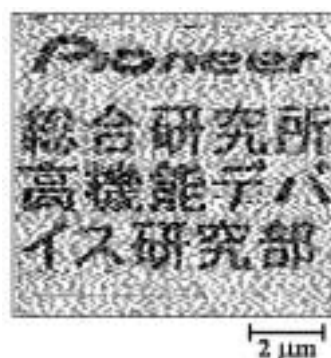


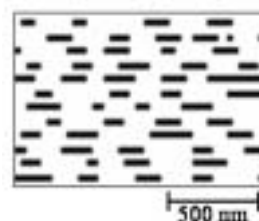
図4 EFMplus 変調信号記録再生実験に用いた原信号

SNDM の検出分解能が最小記録ピットの大きさに対してはるかに高く、トラック間のクロストークの影響を無視できるためである。そこで次に、QR コードのようにデジタルデータをマトリクス状に高密度で記録再生する実験を行った。

図6 に示す原信号を CLT 単結晶記録媒体へ面記録密度 1Tbit/inch² で書き込みを行い、その後、SNDM により測定した分極分布像を図7 に示す。1Tbit/inch² の密度で綺麗にデジタルデータが記録できていることが分かる。



(a)再生信号



(b)再生信号の拡大

図5 EFMplus 変調信号記録再生実験の再生信号



図6 デジタルデータのマトリクス状記録再生実験に用いた原信号

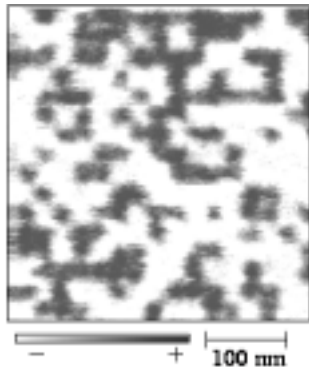


図7 CLT単結晶記録媒体へデジタルデータを1Tbit/inch²でマトリクス状に記録した分極分布像

6. MEMS ダイヤモンドプローブの試作

本方式では現在のところプローブを媒体に接触させ走査する方式をとるため、プローブチップとして耐久性の強い材料を用いる必要がある。そこでMEMS技術プロセスを用いて、ひずみセンサを内蔵した導電性ダイヤモンドプローブを試作し、これを用いて強誘電体記録媒体への記録再生実験を行った。

図8に作製したダイヤモンドプローブとそのチップ部のSEM像を示す。図8(a)はダイヤモンドプローブ、(b)はダイヤモンドチップである。Siで作られたカンチレバーの先端にHot filament chemical vapor deposition(HF-CVD)によりボロンをドーピングしたピラミッド形状のダイ

ヤモンドのチップを成長させた。ダイヤモンドのチップとSNDMの共振回路とは白金(Pt)のラインで導通をとっている。また、カンチレバーの支持部にSiのひずみゲージが造りこまれている。このプローブのばね定数は55N/m、チップ先端半径はおよそ100nmである。

このプローブのひずみセンサとしての性能を検証するためにコンタクトモードのAFMとして形状像の測定を行った。カンチレバーのたわみによるひずみゲージの抵抗値の変化をホイットストーンブリッジ回路を用いて検知する。図9は500nmピッチのグリッドパターンを250nNのコンタクトフォースで形状の測定を行った結果である。ひずみゲージの抵抗値を検出することにより試料の形状像が測定できている。また、

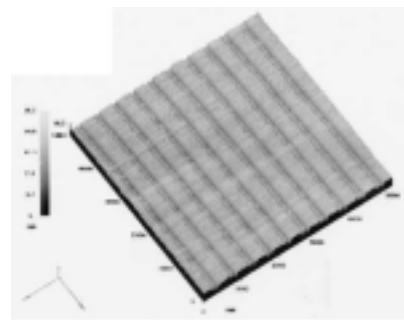
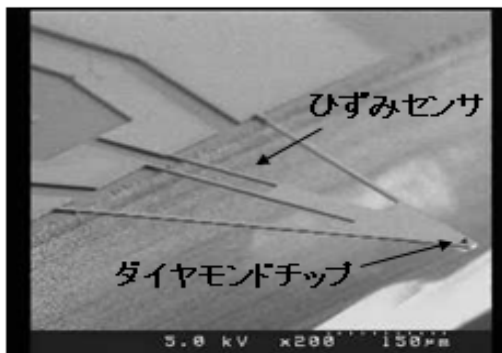
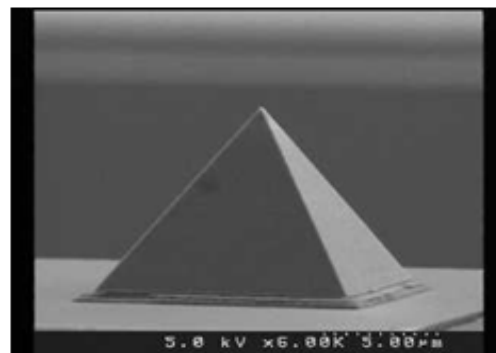


図9 ダイヤモンドプローブに内蔵されたひずみセンサを用いて測定した500nmピッチグリッドパターンの形状像



(a)ダイヤモンドプローブ



(b)ダイヤモンドチップ部

図8 MEMS技術を用いて作製したダイヤモンドプローブとチップ部

ピエゾひずみゲージの変位に対する感度 (R/R) は約 $1 \times 10^{-7}/\text{nm}$ であった。

次に、このダイヤモンドプローブを SNDM のプローブとして用いてマルチドメイン CLT の自発分極分布計測を行った結果を図 10 に示す。図中の暗い領域は分極が上向きの領域、明るい領域は分極が下向きの領域を示しており、これまで用いていた Si のチップを金属膜でコートしたプローブと同様に高分解能に強誘電体の分極分布が測定できている。

次に、このダイヤモンドプローブを用いて強誘電体記録媒体へのドットの書き込み・読み出しを行った。図 11 は前述した 3 章の CLT 単結晶記録媒体へ 11V, 10 μs のパルス電圧を用いてドットの書き込み・読み出しを行った結果である。反転ドメインの形状が少し縦長になって

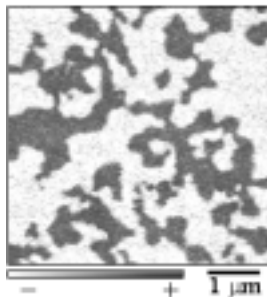


図 10 導電性ダイヤモンドプローブを用いて測定した CLT 単結晶のマルチドメインの分極分布像

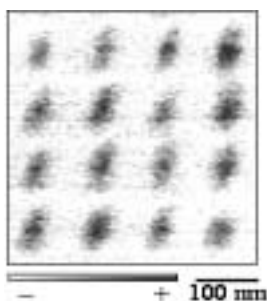


図 11 導電性ダイヤモンドプローブを用いて CLT 単結晶記録媒体へ 11V, 10ms のパルス電圧によりドットの書き込み・読み出しを行った結果

はいるが、小さいもので直径 50nm 程度の微小な分極の反転が行えていることが分かる。

以上のように今回試作したひずみセンサ付きダイヤモンドプローブにより形状の測定、強誘電体への記録再生が可能であることを確認した。

7. まとめ

超高密度強誘電体プローブメモリの実用化を目指して、CLT 単結晶記録媒体へ実際の超高密度デジタルデータ記録再生に近い形での記録再生実験を行った。

まず、DVD における記録再生のように EFMplus 変調されたデジタル信号を線記録密度 726Kkbp i でトラック間隔を十分に取って記録を行い、同トラック上を 1 回スキャンすることでデータを再生することに成功した。さらに高密度な記録再生を行うためにデジタルデータをマトリクス状に配列する記録再生を行い、記録密度 1Tbit / inch² での記録再生に成功した。

次に、MEMS 技術を用いてひずみセンサを内蔵した導電性ダイヤモンドをチップとするプローブを試作し、このプローブにより接触圧力の測定、強誘電体の分極分布の測定、強誘電体への情報の記録再生が可能であることを確認した。

8. 謝辞

本研究に関して日頃よりご指導いただきありがとうございます東北大学電気通信研究所の長康雄教授、東北大学大学院工学研究科の江刺正喜教授、小野崇人助教授および関係各位に深く感謝を致します。

参考文献

- (1) Y.Cho et.al., "Scanning nonlinear dielectric microscopy with nanometer resolution", Appl.Phys.Lett., 75 ((1999)2833-2835.
- (2) P.Vettiger et.al. "The Millipede" -More than one thousand tips for future AFM data storage", IBM J.RES.DEVELOP.44 (2000))p.323.

- (3)Y.Cho et.al. "Tbit/inch² ferroelectric data storage based on scanning nonlinear dielectric microscopy", Appl.Phys.Lett.,81(2002)4401-4403.
- (4)H.Takahashi et.al. "Diamond probe for ultra-high-density ferroelectric data storage based on scanning nonlinear dielectric microscopy".IEEE International Conference on micro electro mechanical Systems(20044)p.537.

筆 者 紹 介

藤 本 健 二 郎 (ふじもと けんじろう)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス
研究部。強誘電体プローブメモリの開発に
従事

高 橋 宏 和 (たかはし ひろかず)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス
研究部。Ga N 系青紫色半導体レーザの研究開
発を経て、現在、強誘電体プローブメモリの
開発に従事。

前 田 孝 則 (まえだ たかのり)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス
研究部。光ピックアップの開発等などを経
て、現在、強誘電体プローブメモリの開発に
従事。

尾 上 篤 (おのえ あつし)

技術開発本部 総合研究所 高機能デバイス
研究部。磁気ヘッド、薄膜結晶SHG デバイス
の研究開発を経て、現在、強誘電体ストレ
ージ、二波長集積半導体レーザの開発に従事。