

氏名	ひらなが よし おみ
授与学位	平 永 良 臣
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成18年3月24日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
指導教員	SNDM 強誘電体プローブメモリの研究
論文審査委員	指 導 教 員 東北大学教授 長 康雄
	主査 東北大学教授 長 康雄 東北大学教授 中村 僖良
	東北大学教授 村岡 裕明

論文内容要旨

近年, 大容量記録メディアの記録密度は年率 100% という驚異的な速さで伸びており, 1 Tbit/inch² を超える日もそう遠くないと考えられる. しかしながら, 現在ハードディスクドライブ等において広く用いられている磁気記録方式は記録密度を上げていくと磁気的な熱擾乱によって記録情報が消失するといった問題を抱えており, これに代わる新たな高密度記録方式の開発が望まれている. そこで本研究では再生デバイスとして走査型非線形誘電率顕微鏡 (Scanning nonlinear dielectric microscopy; SNDM) を用いた強誘電体記録方式を提案する.

SNDM は強誘電体の局所的な分極の方向を純電氣的に判別することが可能な顕微鏡である. この顕微鏡の分解能は現在のところサブナノスケールであることが確認されており, これまで困難であった強誘電体ドメインの微細構造の観測が簡単に行えるようになった. 図 1 に本顕微鏡を応用したドメインエンジニアリングシステムの構成を示す. プローブは LC 共振器で構成されている帰還部に探針がつけられた発振器, 及びアース電位に固定されている高周波のリターン回路用金属リングで構成されている. 探針には先端半径 25 nm の導電性カンチレバーを用いた. 極性判別は試料に微小交番電界を印加したときに生ずる非線形誘電応答を LC 共振回路の共振周波数の微小変化として検出し, それを復調することで行う. また, 書き込みは探針と記録媒体の下部電極との間にパルス電圧を印加し, 局所的に分極を反転させることで行う. 記録媒体にはタンタル酸リチウム (LiTaO₃) 単結晶を用いた. この材料は低コストで良質な単結晶を作製することができることに加え, 180°c-c ドメイン構造のみを持つ, 室温付近に相転移点が存在しないといった記録媒体に適すると思われる特徴を有する.

探針を電極として用いて強誘電体上に微細なドメイン構造を形成し高密度記録に応用するためには記録媒体の厚さを可能な限り薄くすることが重要となる. 現在, MOCVD 法, ソルゲル法, スパッタ法など, 様々な成膜法によって強誘電体薄膜を作製する研究が不揮発性メモリ応用の分野を中心に盛んに行われており, これまでに膜厚 13 nm という極めて薄い膜においても強誘電性が存在するなどの報告がなされている. しかしながら, これらの強誘電体薄膜はグレイン境界などのドメイン反転を阻害する欠陥を多数含んでおり, ビットサイズが 50 nm を下回る大容量記録媒体への応用に適した均質な強誘電体薄膜を上記のような手法で得ることは現状では困難である. 一方, Czochralski 法などによって作製されたバルク状の強誘電体単結晶はナノスケールで見ても十分な均質性を有しており, 大容量記録媒体への応用に適していると考えられる. そこで, 本研究では基板上で強誘電体を成長させた薄膜を用いるのではなく, このようなバルク状の強誘電体単結晶を薄く加工するこ

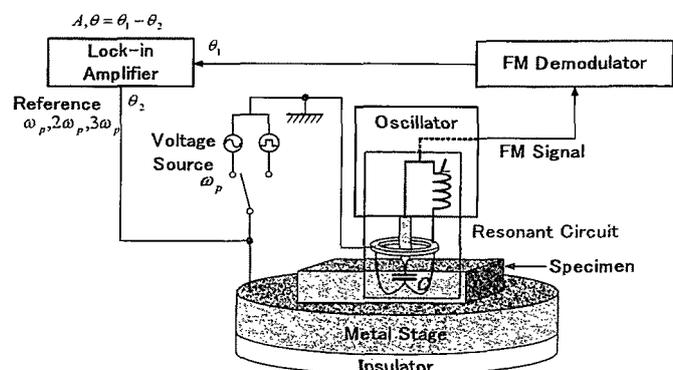


図 1: SNDM の装置構成

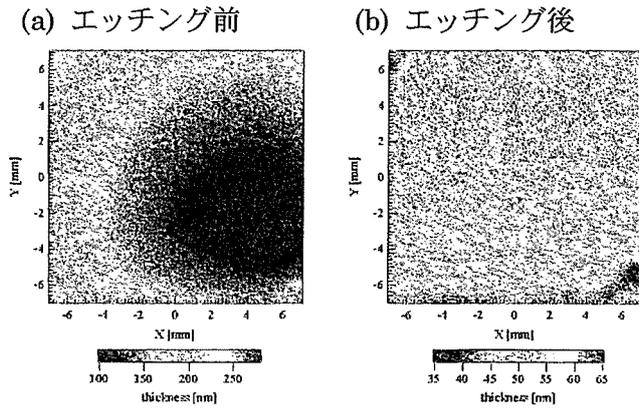


図 2 : LiTaO₃ 単結晶記録媒体の厚さ分布

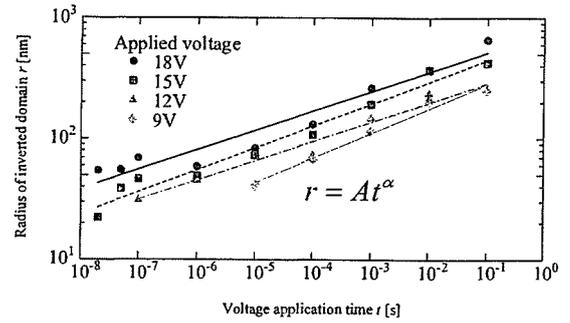
とによって記録媒体を作製することとした。

記録媒体の薄片化に使用したドライエッチング装置の試料台には二軸自動ステージが取り付けられており、加工後の結晶の厚さが均一となるように結晶上の各点のイオンビーム照射時間を調節することができる。図 2 にエッチング前、およびエッチング後の LiTaO₃ 単結晶記録媒体（記録面サイズ：14×14 mm²）の厚さ分布を示す。エッチング前は平均 152.1 nm であった試料厚をエッチングによって 48.5 nm まで薄くした。また、標準偏差で評価した厚さのばらつきについては、エッチング前は 28.8 nm であったのに対し、エッチング後には 3.1 nm まで減少した。

さらにこの加工法に加え、実際の製造工程ではプロセス時間の短縮化が求められることを踏まえ、分極制御ウェットエッチング法を開発した。この手法は、強誘電体のエッチレートがその極性によって大きく異なるという特徴を利用し、ウェットエッチングを行う際に強誘電体結晶に直流電圧を印加することによって、特定の厚さに達した部分のみを選択的に分極反転させてエッチングの進行を止めることで結晶全域の厚さを一定とするように制御するものである。この手法によっても、厚さの分布が少ない（標準偏差：4.8 nm）結晶の作製が可能であることを示した。但し、加工可能な厚さに関しては現状では最小で 450 nm 程度であった。さらに薄く結晶を加工するためには表面にエッチピットが形成されることを防ぐ必要がある。

次に強誘電体高密度記録に関する基礎的知見を得ることを目的として、上述の手法で作製した LiTaO₃ 単結晶記録媒体を用いてナノドメインの書き込みの実験を行った。LiTaO₃ には、定比組成 LiTaO₃ (Stoichiometric LiTaO₃; SLT) および一致溶融組成 LiTaO₃ (Congruent LiTaO₃; CLT) といった、わずかに組成の異なった 2 種類の商業的に入手可能な結晶が存在する。それぞれの結晶について得られた主な実験結果は以下のとおりであった。

SLT は結晶欠陥が少なく抗電界が低いため、低電圧かつ高速なパルス電圧によってドメイン反転が可能であり、厚さ 150 nm の結晶に対し 15 V、20 ns のパルス電圧によってナノドメインの書き込みを行うことができた。（図 3）これに対し、CLT は Li 点欠陥の存在に由来するピンニングサイトを多く含んでいるため、分極反転速度は SLT に比べ遅く、同じ試料厚 150 nm、書き込み電圧 15 V の条件のもとでナノドメインの生成が確認できた最小のパルス時間幅は 1 ms であった。（図 4）但し、CLT の場合でも書き込み電圧を 27 V まで上昇させた場合は 100 ns という比較的短いパルス電圧によるナノドメインの生成が確認されており、平行平板電極を用いたマクロな分極反転においては通常 1 s 程度の安定化時間を要することとは対照的な結果となった。この点に関しては、探針に電圧を印加した際、先端近傍に極めて高い電界が発生すること、および、電圧印加中に結晶表面に蓄積された電荷が電圧印加終了後も留まっていることが、ドメインの安定化に寄与しているものと予想される。



Applied voltage	A	α
18V	7.49×10^2	0.16
15V	6.81×10^2	0.18
12V	4.18×10^2	0.16
9V	4.54×10^2	0.20

図 3 : SLT に書き込まれた分極反転ドメインの半径の電圧印加時間依存性

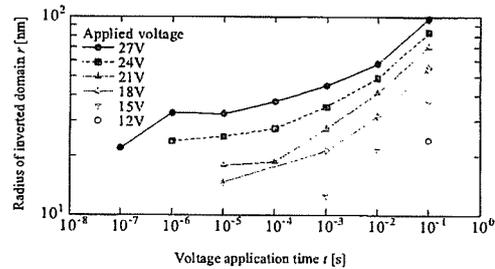


図 4 : CLT に書き込まれた分極反転ドメインの半径の電圧印加時間依存性

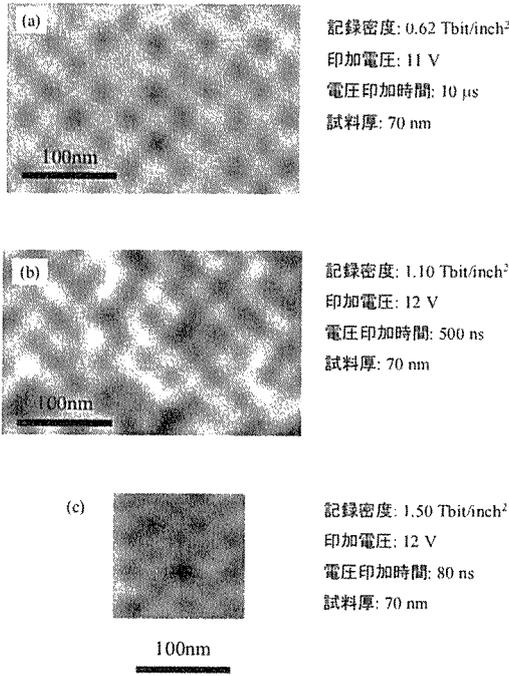


図5：CLT上に高密度に書き込まれた分極反転ドメイン

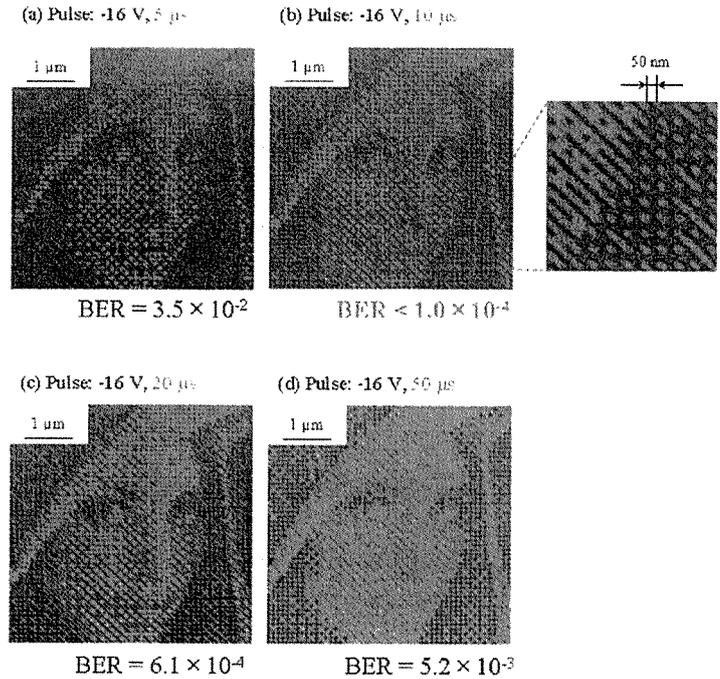


図6：記録密度258 Gbit/inch²でCLT単結晶に記録された実データのビット誤り率

一方、ドメインの大きさに関しては、単一のドットとしてはSLTにおいて最小で半径6 nmのナノドメインの書き込みが行えた。しかしながら、複数のドットによって微細なパターンを書き込む場合、SLTはドメイン壁が電界印加によって比較的動きやすいため、あるドメインドットの形状を維持したままその近傍に探針を移動して電圧を印加し他のドメインドットを生成するといった操作が難しく、結果としてドメインドットを高密度に書き込んだとき、全てのドットが結合しやすい傾向にあった。これに対しCLTではピンニングサイトの存在によってドメインドットの面内方向の広がりが阻害される結果、SLTに比べて微細なパターンの書き込みが可能であった。そこでCLT上に最密格子状にドメインドットを書き込むことで実現可能な記録密度を調べ、書き換え可能な記録方式としては初めて1.5 Tbit/inch²の記録を行うことが可能であることを示した。(図5)

一方、現実の記録デバイスには記録密度以外にもシステムの高速度、高信頼性などが求められる。そこで、強誘電体高密度記録方式の実用化に向けた要素技術を確認するためにリニアスキャナ型SNDM強誘電体プローブメモリの試作を行った。この装置を用いてデータ転送速度の評価を行い、線記録密度440 kbit/inchのビットパターンに対して、50 kbpsの書き込みおよび12 kbpsの読み出しが可能であることを確認した。また、ビット誤り率についても評価を行った。図6はCLT単結晶に記録密度258 Gbit/inch²で記録された実データのSNDM像である。これらの像より、書き込み波形の最適化を行うことによってビット誤り率を 1×10^{-4} 未満とすることが可能であることが分かった。またこれに加え、若干のビット誤りを含むものの1 Tbit/inch²級の記録密度で実データを記録することが可能であることも確認した。

リニアスキャナ型SNDM強誘電体プローブメモリを用いた記録再生では、ピエゾスキャナの移動速度がデータ転送速度を制限してしまう問題がある。これに対してプローブを多数使用して並列的に記録再生を行う、いわゆるマルチプローブ方式は一つの解決法であるが、信号処理系の規模が膨大になるという問題があり、極端にプローブ数を増やすことは現実的な方法ではないと思われる。そこで、1プローブあたりのデータ転送を高速にすることを目標として新たに回転ディスク型SNDM強誘電体プローブメモリを試作した。本装置の開発に当たってまず記録媒体を高速回転させる際に生じる記録面の大きなぶれに対し、記録再生ヘッドを高速に追従させなければならないといった課題があった。そこで、フィードフォワード制御を導入した独自のヘッド高さ制御手法を開発し、プローブの接触圧の変動を従来法に比べて3分の1以下に低減させた。また、この装置を用いて転送速度200 kbpsで書き込みが行えることを確認した。

論文審査結果の要旨

近年、小型情報端末機器の普及から超高密度情報記録に対する要求が高まり、それに応じて年率100%という驚異的な速さで記録密度が伸びている。しかしながら、Tbit/inch²級の記録密度の実現の前には様々な障壁が立ちはだかっていることもまた事実であり、例えば現在ハードディスクドライブ等において広く用いられている磁気記録方式においても1Tbit/inch²を超える記録密度の実現にはかなりの困難が予想されている。

このような背景の中、筆者は次世代超高密度強誘電体記録に関する基礎的知見を得ることを目的として、走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) を用いたナノスケール分極反転に関する実験と記録再生装置である SNDM 強誘電体プローブメモリの試作を行った。

本論文はこの SNDM 強誘電体プローブメモリに関して行った研究をまとめたものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では強誘電体単結晶を高密度記録媒体として用いるための加工技術について述べている。記録媒体は数十ナノメートルの厚さで数mmから十数mm角の広さを必要とし、厚さの分布も極めて小さなものでなくてはならない。このような媒体の加工を行う具体的な手法として、ドライエッチングを応用した新しい薄片化方法及び分極制御ウェットエッチング法を考案し、実際にタンタル酸リチウム (LiTaO₃) 単結晶を加工して14×14 mm²の面積を持ち、厚さ48.5nm標準偏差3.1nmの大面积で極めて均一な単結晶媒体の作製に成功した。この成果により、記録再生実験の使用に十分耐えうる強誘電体記録媒体が得られるようになった。これは強誘電体記録の研究の基盤をなす大きな成果である。

第3章では第2章で開発に成功したLiTaO₃単結晶記録媒体を用い、微小領域における分極反転特性を調べている。得られた最小の単一ナノドメインは半径6nmの大きさであった。更に最密に多数のビットを書き込み、書き換え可能な記録方式としては世界最高である1.5Tbit/inch²の記録密度を達成している。これは強誘電体記録が超高密度記録の有力な候補となりうることを実証したものであり、極めて高く評価できる。

第4章ではリニアスキャナ型 SNDM 強誘電体プローブメモリを試作し、これを用いてデータ転送速度およびビット誤り率に関する評価を行っている。データ転送速度については、線記録密度440kbit/inchのビットパターンに対して、50kbit/secの書き込みおよび12kbit/secの読み出しが可能であることを示した。一方、ビット誤り率に関しては、258G bit/inch²の記録密度で記録した実データに対し10⁻⁴未満のビット誤り率を達成し、更にこれに加え、若干のビット誤りを含むものの、実データを1Tbit/inch²級の記録密度で記録することに成功している。

第5章では回転ディスク型 SNDM 強誘電体プローブメモリの開発について述べている。この装置は最大20000rpmのスピンダルモータを用いて高速に記録再生を行うためのものであるが、これを行う際、記録面が大きく振動するため、独自に開発したフィードフォワードを導入した高さ制御法によって、カンチレバーのたわみ量の変動を50nm程度まで低減できることを示し、また実際にこの装置を用いてリニアスキャナ型より高速に書き込みが行えることを示している。

第6章は結論であり、本研究で得られた知見を総括し今後実用化に向けた SNDM 強誘電体プローブメモリ技術の発展について展望している。

以上要するに本論文は、SNDM を用いたナノスケール分極反転に関する実験と SNDM 強誘電体プローブメモリの試作を通じて、次世代超高密度強誘電体記録に関する多くの知見を与えたものであり、電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。