

MEMS 技術を応用したアクティブ浮上量制御形ヘッドの開発動向

Recent Advances in MEMS-based Active Head Sliders with Micro-actuators for Flying Height Control

多川則男 関西大学工学部機械工学科
N. Tagawa, Kansai University

This paper describes recent advances in MEMS-based active head sliders with micro-actuators for flying height control. The technical issues related to head/disk interface for future ultra-high-density magnetic hard disk drives were investigated and it became clear that active head sliders are a break-through technology for achieving ultra-low head/disk interface spacing of less than 10 nm. Various attempts to develop active head sliders with micro-actuators are reviewed, and state-of-the-art technologies for active head/disk spacing control are explained. The design procedure and micro-machining process for MEMS-based active sliders are also discussed. In addition, novel multilayered composite PZT thin-film micro-actuators, which are very important functional micro-devices, are studied, and it is shown that the recently developed PZT thin films have better piezoelectric characteristics than not only conventional sol-gel derived PZT thin films but also sputtered PZT thin films. This suggests the feasibility of realizing active sliders operating at lower voltages in ultra-high-density magnetic hard disk drives.

Key words: magnetic hard disk drives, active head sliders, head/disk interface, PZT thin films, micro-actuator, micro-electro-mechanical systems

1. はじめに

「IT (情報技術)」というキーワードが毎日のように新聞紙上を賑わしている。これはパソコンが膨大なデジタル情報を高速に処理できるようになったからであるが、それを大きく支えているのは大容量高速のハードディスク装置 (HDD) であろう。最近にはさらに一般家庭用の HDD 録画機や、デジタルカメラ用 1 インチ HDD などが開発され、日常生活に非常に身近な情報機器となってきた。この HDD は、周知のとおり、種々のテクノロジーインベションの結晶であるが、とりわけヘッド・ディスク・インタフェース (HDI) 微小すき間化技術がその進化の鍵を握るコアテクノロジーとなっている。従来は周知のとおり、空気膜潤滑による浮上ヘッド・スライダに代表されるパッシブなすき間制御技術が用いられてきたが、10 nm レベルの

すき間の極限化に対応して、最近マイクロアクチュエータを利用したアクティブな HDI すき間制御技術の開発が試みられてきている。ここでは最近のそのような新しいアクティブ制御スライダ開発の現状とその可能性、技術課題について展望しよう。

2. HDD の高密度大容量化と HDI 微小すき間化の進展

HDD の記録密度は 1990 年頃から年率 60~100% の伸びを維持しており¹⁾、最近では 20~30 Gb/in² 程度の超高密度化が実現されている。その高密度化の進展につれて、HDI におけるヘッド浮上すき間 (浮上量) もこの 10 年間で 100 nm 程度から 10~15 nm へと約 1/10 の微小化が進んできた²⁾。Fig. 1 にその浮上量の微小化のトレンドを、Fig. 2 に最近の HDI の構成と寸法を示す。ヘッドディスクが接触起動停止方式 (CSS 方式) を行うハードディスク

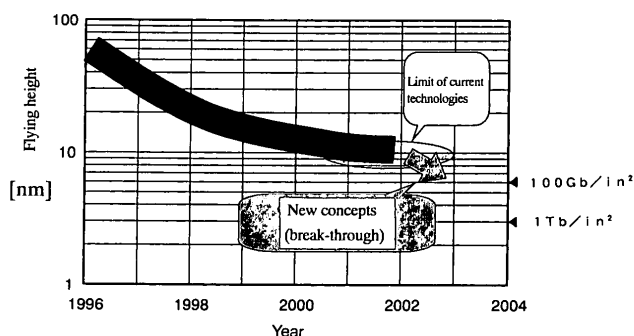


Fig. 1 Head/disk interface spacing trend.

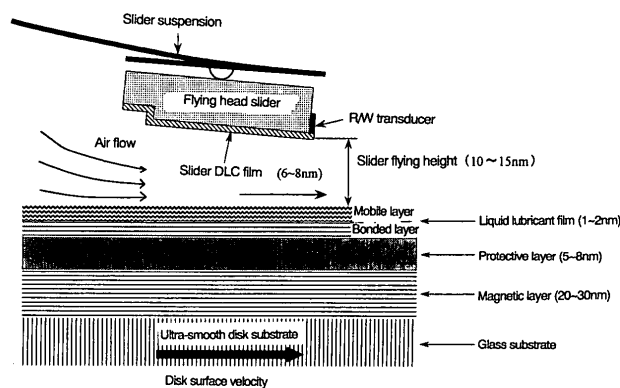


Fig. 2 Schematic of the head/disk interface.

装置ではスライダ・ディスクの静止時のスティクション（吸着）がトライボロジーのパラドックスといわれ、すき間微小化の大きな課題となっていた。スライダとの接触面積を小さくするため、媒体上にテクスチャー（突起）をレーザーにより形成する技術やスライダ面に微小なパッドを設ける技術などが開発されているが、いずれもスライダ浮上量の微小化には不利である。そこで起動停止時にヘッドがディスクと接触しないように静止時にスライダをランプ（坂道）機構上に引き上げておくランプロード・アンロード方式が採用され、初めて超平滑ディスクの採用が可能となった。またスライダ形状も小型化とともに浮上量の気圧・周速・スキュー角依存性の極めて少ないデュアルエッチング形負圧スライダが開発された。HDIの信頼性を高めるため、Fig. 2 に示したように、ディスク上には1~2 nmの単分子膜レベルの液体潤滑膜がディップ法により塗布されている。ポイントは液体潤滑膜の自己保持機能と自己修復機能とを同時に果たせることである。そのため平滑保護膜と液体潤滑剤との相互作用や種々の処理法により流動層と固定層からなる二層分子膜潤滑がなされている。また $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ボディ製スライダの摺動面には記録再生素子を保護するとともに Al_2O_3 による液体潤滑剤の分解などを抑制するため、スパッタリングなどの方法によりDLC (Diamond Like Carbon) 保護膜が付けられている。これまでの浮上量低下は、以上のようなナノ・トライボロジー技術の開発により大きく進展してきた。しかし最近、Fig. 1 に示したように、10 nm 以下レベルにスライダ浮上量低下を図るのは現状技術では非常に困難ではないかとの見方が始めている。これはスライダおよびディスクの表面平滑性に対する加工限界や、スライダとディスク潤滑剤の相互作用によるスライダの振動、スライダおよびサスペンションの形状寸法、負荷荷重のばらつきによるスライダ浮上量変動などを総合的に考慮すると浮上マージンの確保が難しいということである。したがってこれまでにないブレークスルー技術の開発の必要性が高まっているわけである。このような観点からこれまでの空気膜潤滑に基づくスライダ技術とはその設計コンセプトの上で全く発想を異にする薄膜マイクロアクチュエータを利用したアクティブ制御スライダに関する研究が10 nm 以下のすき間の実現に向けて進展し始めている。

3. アクティブ制御スライダの歴史

実はアクチュエータ技術を利用してアクティブにHDIのすき間を制御しようとする試みはおおよそ16年ほど前にIBMなどにより行われた^{3), 4)}。この当時は浮上すき間100 nm 以下をいかに実現するかということが大きな技術課題であった。「コンタクトレコーディング」という言葉もこの時にすでに使われている。当時提案されたアクティブスライダコンセプトには2種類ある。すなわち、プライマリ・

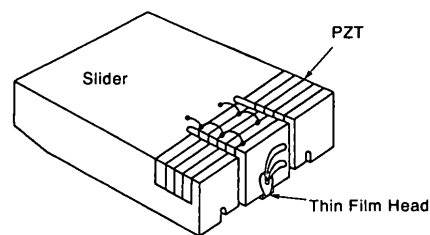


Fig. 3 Schematic of the active head slider using bulk PZT actuator.³⁾

スライダは気体軸受を採用するとともに、セカンダリ・スライダ部分（記録再生素子を搭載している）をアクチュエータが搭載されたマイクロカンチレバー構造とするマゼーシップ形とし、アクティブにそのマイクロカンチレバー先端とディスク面とのすき間を制御するパッシブ・アクティブ併用方式³⁾と、スライダの気体軸受面形状をアクチュエータにより *in-situ* に変化させ、それによりHDIのすき間制御をパッシブ技術のみにより制御する方式⁴⁾の2種類である。Fig. 3 に前者方式で開発されたスライダ構成の概念図を示す。なおアクチュエータとしては16年前にはバルクPZTが多く使われていた。そのため小型化が困難、また当時のスライダ設計技術はまだ不十分で、プライマリ・スライダの浮上量がディスク内周側と外周側とで大きく異なり、セカンダリ・スライダのすき間制御が困難等の問題があり、技術のfeasibilityを確認したレベルであった。

4. 最近の新しい技術開発動向

それから16年後、今また10 nm 以下のすき間を実現するために改めてこの技術が見直され、検討され始めている。マイクロマシン技術による薄膜マイクロアクチュエータを利用してアクティブに10 nm 以下のナノメートルHDIを実現しようとする試みがブレークスルー技術として進展してきた。薄膜アクチュエータとしてはPZT薄膜^{5), 6)}、静電マイクロアクチュエータ⁷⁾などがその候補である。また最近IBMから新しいアプローチとしてマイクロマシン技術による薄膜マイクロヒーターを利用して *in-situ* に負圧スライダ面形状を熱変形させることにより形状制御し浮上すき間をアクティブに制御する方式⁸⁾の実験結果が示された。開発されたアクティブスライダは負圧スライダの負圧発生面にPtのマイクロヒーターをマイクロマシーニングにより作製したもので、従来のMRヘッドスライダ作製プロセスに大きな変更を施さずに作製可能である。スライダの各種製造誤差に起因する浮上量のばらつきを補償する機能をスライダ自身にもたせるために開発された技術である。30 nm 程度の定常浮上量に対して2~3 nm 程度の浮上量が、三角波状にマイクロヒーターに印加された2 Vの電圧変化に追従して変化（定常浮上量の約10%程度）することを確認している。熱を利用する方

式は高速応答性が問題であると考えられるが、初めての提案で興味深い。

一方、カーネギーメロン大学においても目標浮上量制御範囲 ± 5 nm を掲げた MEMS ベースのモノリシックな静電アクチュエータ構造と現実的な成形加工プロセスの提案および同アイデアに対するシミュレーションが開始されている⁸⁾。さらに最近では厚み 80 μm のバルク PZT と厚み 50 μm のシリコンの 2 層を接着剤ではりあわせたユニモルフ構造を利用するとともに、スライダ面を工夫し、アクチュエータ変形前後でスライダの浮上姿勢が変化しないアクティブ制御スライダが設計開発試作されて、アクティブに浮上量制御が可能であることが確認される⁹⁾など、アクティブ制御スライダ技術は各研究機関で大きな進展を示し始めている。

Fig. 4 は著者らが開発を進めているアクティブスライダの一例⁶⁾である。基本的にはパッシブ・アクティブ併用方式である。マザーシップ形スライダ機構を採用し、プライマリ・スライダはこれまでの空気膜潤滑によるスライダで、システムのプラットフォームとなる機能をもつ。およそ 10 nm 程度浮上するように設計されている。セカンダリ・スライダが PZT 薄膜を搭載したユニモルフ形のアクティブスライダである。PZT 薄膜を採用した理由は、他のアクチュエータと比較すると高速応答特性が良好である、比較的大きな力が出せる、本方式のヘッドにおいては、変位量は nm レベルで小さくて良いなどである。またこの方式の特徴は情報の記録再生時のみセカンダリスライダを *in-situ* に 10 nm 以下の超微小すき間状態に制御するところにある。その意味でオンデマンド形であり、常に連続的に超微小すき間状態を維持・実現しようとするパッシブ形とは大きく異なる設計コンセプトを有している。16 年前のものと比較して、著者らの提案しているものは PZT 薄膜を利用しているので小型化が可能、プライマリ・スライダは最近の浮上設計技術の進歩によりディスク全面にわたって一様な浮上量で浮上するのですき間制御が容易、などと大きく改善されている。次に本方式のアクティブ制御スライダを例として PZT 薄膜を利用したアクティブ制御スライダの設計法ならびに新規な PZT 薄膜、およびアク

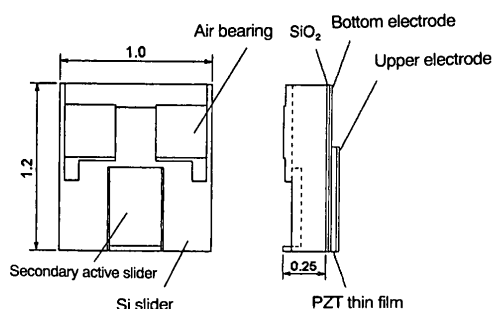


Fig. 4 Schematic of the proposed active head slider.

ティブ制御スライダを作製するためのマイクロマシーニングプロセスなどについて紹介しよう。

5. PZT 薄膜を利用したアクティブ制御スライダ技術

5.1 アクティブ制御スライダの設計法⁷⁾

Fig. 5 にアクティブ制御スライダを背面からみた模式図を、Fig. 6 にアクチュエータ部の薄膜断面図をそれぞれ示す。このアクチュエータの基本的仕様は、Z 軸方向変位量 ≤ 20 nm, 印加電圧 ≤ 30 V, 固有振動数 ≥ 100 kHz と設定した。まず静特性設計について述べる。Fig. 5 よりアクチュエータ部は、下部電極 (Pt/Ti), 上部電極 (Pt) の厚みを無視すると、近似的に厚み h_p の PZT 薄膜がその表面に塗布された長さ l , 幅 B , 厚み h_e のユニモルフカンチレバー構造と考えることが可能である。本場合、特に h_p は h_e に比較して極めて薄いので、その条件を使うとカンチレバー先端変位 ΔZ は次式で近似できる。

$$\Delta Z = \frac{3d_{31}Vl^2}{h_e\{3h_p + (E_e/E_p)h_e\}} \quad (1)$$

where d_{31} : Piezoelectric strain constant

V : Applied voltage,

l : Microcantilever length

h_e : Silicon microcantilever thickness

h_p : PZT thin film thickness

E_e : Young's modulus of silicon

E_p : Young's modulus of PZT thin film

d_{31} : 88×10^{-12} m/V (Sol-Gel PZT)

d_{31} : 49×10^{-12} m/V (Sputtered PZT)

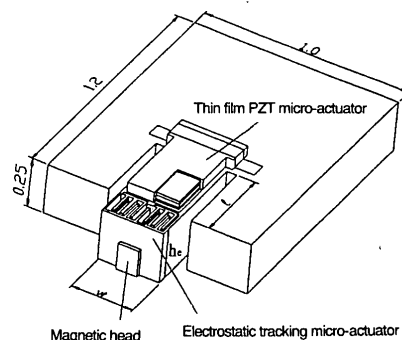


Fig. 5 3-Dimensional schematic of the active head sliders.

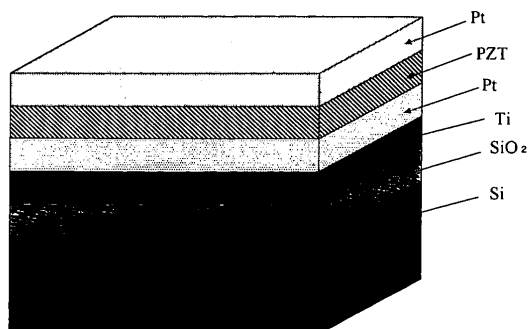


Fig. 6 Fabricated PZT thin films structure.

式(1)より先端変位は圧電定数、印加電圧に比例し、カンチレバー長さの2乗に比例する。この式を用いて主要な諸元を決めればよい。当然長さ l に関しては長く設計すれば大きな変位がとれるが、しかし系の固有振動数が小さくなるため適切な値に設定することが重要である。またPZT薄膜の圧電定数はそのプロセス製造方法に大きく依存する。ここでは典型的なPZT薄膜としてゾルゲル法、スパッタ法によるものを考え、その両者の圧電定数をそれぞれ適用して先端変位を計算した。Fig. 7は一例として印加電圧20Vのときの h_e と Δz との関係を示したものである。ゾルゲル法のPZT薄膜の方が大きな圧電定数が得られるため変位が大きくとれる。また h_e が小さいほど先端変位は急激に大きくなるのがわかる。また h_p の先端変位に及ぼす影響であるが、 h_e に比較して極めて薄いためほとんど影響しない。したがって h_p は動特性ならびに印加電圧とPZT薄膜の抗電界特性、絶縁破壊特性などの観点も考慮して決定されるべきであろう。本設計ではそのような検討により主要諸元として長さ l 、PZT薄膜厚みをそれぞれ $500\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、シリコンカンチレバー厚み h_e を $200\mu\text{m}$ （ゾルゲル法によるPZT薄膜）、 $150\mu\text{m}$ （スパッタ法によるPZT薄膜）と設定した。次に動特性設計であるが、以上の諸元を有するマイクロカンチレバー単体の一次曲げモード固有振動数を求めた。その結果、マイクロカンチレバー単体の固有振動数はPZT薄膜が塗布されることによ

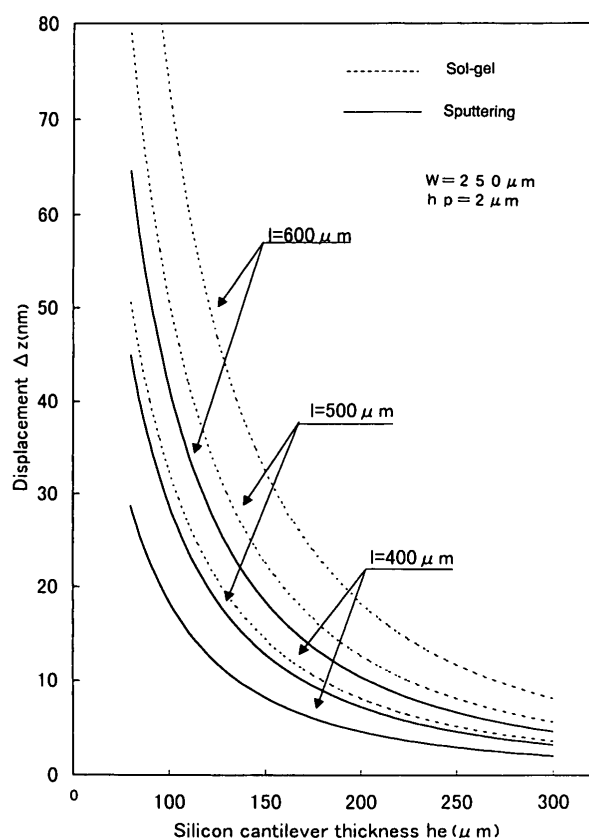


Fig. 7 Si cantilever thickness vs. displacement characteristics.

り低下することがわかった。したがって動特性の観点からはPZT膜厚は薄い方がよい。さらに実際のピコスライダ構成での動的設計を最適化するため、その動特性を3次元有限要素法(FEM)により計算した。Fig. 8に求めた固有振動モードを示すが、本設計では2次モードである曲げモードの固有振動数を高めることが重要である。マザーシップ構成にするためにスライダ面内に設けた溝幅を最適に設計することにより、ピコスライダの固有振動数はゾルゲル法、スパッタ法それぞれのPZT薄膜を使用した場合に対して、700 kHz、600 kHz程度となり、動特性上良好な特性を有する構造を実現することができた。

5.2 ゾルゲル・スパッタ複合多層PZT薄膜マイクロアクチュエータの創製¹⁰⁾

本方式を実用化するためには多くの技術課題があるが、その中でもやはり薄膜マイクロアクチュエータそのものが大きな課題の一つであろう。一般的にPZT薄膜はバルクPZTに比べると圧電定数 d_{31} が小さく、必要な変位を得るためには大きな印加電圧をかけねばならない。しかし一方アクティブスライダはなるべくより低電圧で駆動できることが実用的には大切で、マザーシップ形のスライダ面形状を工夫し、アクティブスライダで発生する浮上力を最小にするとともに、大きな d_{31} を有するPZT薄膜の開発が重要となる。従来はゾルゲルPZT薄膜、スパッタPZT薄膜をそれぞれ単一膜として利用しているのが通常である。しかし今回ゾルゲルPZT薄膜とスパッタPZT薄膜を二層積層した複合多層強誘電体薄膜を開発し、新規なPZT薄膜を創製した。周知のとおり、PZT薄膜はスピニングあるいはスパッタリングにより得られるアモルファス膜を加熱することにより結晶化させ、ペロブスカイト結晶構造を実現することが必要である。この結晶化は核生成と結晶成長の2段階を経て起こり、配向膜生成させることが極めて重要となる。スパッタリング法による薄膜は、多孔質であるゾルゲル法による薄膜よりもより緻密な薄膜であり、基板と薄膜界面で核が生成しやすく、配向膜形成が起こりやすいと考えられる。したがってスパッタリング法によるPZT薄膜を下部電極の上にまず作製し、その薄膜をシード層として機能させ、その上にゾルゲル法による薄膜を作製した複合多層PZT薄膜構造とすれば極めて結晶配向性の良い新しいPZT薄膜が創製できる可

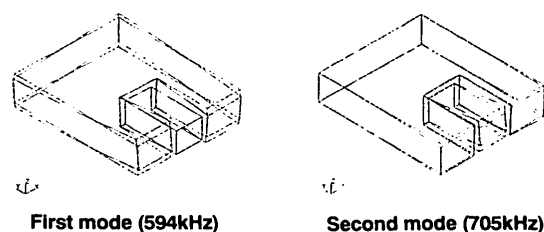


Fig. 8 Dynamic characteristics of the proposed active head slider.

能性があると考えられる。このような設計コンセプトのもとに複合多層 PZT 薄膜を開発した。その結果、複合多層膜にすることにより強誘電体特性が大きく改善され、ゾルゲル PZT 薄膜、スパッタ PZT 薄膜いずれの薄膜よりも良好な強誘電体特性を有するマイクロアクチュエータであることが確認できた。Fig. 9 に創製した PZT 薄膜からなるマイクロダイアフラム構造を示す。下部電極 Pt/Ti の上に 540 nm 厚のスパッタ PZT 薄膜を対向ターゲットスパッタリング法で作製し、その上に 540 nm のゾルゲル PZT 薄膜を作製した。Fig. 10 に著者らが提案する複合多層 PZT 薄膜の作製プロセスを、また Fig. 11 にその作製された PZT 薄膜の強誘電体特性 P-E ヒステリシス特性の一例を、膜厚をほぼ同一としたゾルゲル、スパッタ単一膜の PZT 薄膜と比較して示す。同図より複合多層 PZT 薄膜が他のいずれの PZT 薄膜よりも極めて良好な特性を有していることがわかる。さらに、このマイクロアクチュエータに電圧を印加してダイアフラム中心の変位量を顕微鏡下で作動するレーザードプラー振動計を用いて実験的に計測した。Fig. 12 にその測定結果の一例を、ゾルゲル単一膜の PZT 薄膜の結果と比較して示す。おおよそ 10 V の電圧に対して、複合多層 PZT 薄膜の場合、ゾルゲル単一膜の PZT 薄膜よりも約 2 倍の変位量である 150 nm 程度の変

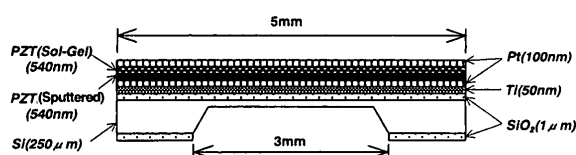


Fig. 9 Fabricated diaphragm micro-actuator with novel PZT thin films.

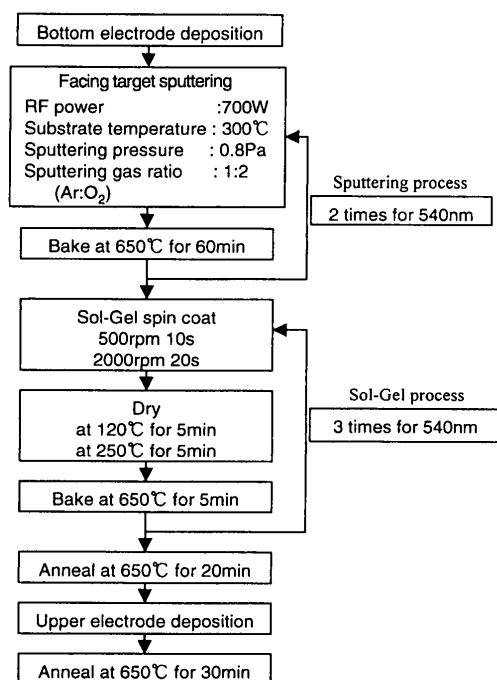


Fig. 10 Fabrication process for novel PZT thin films.

位量が得られていることがわかる。さらにその創製した PZT 薄膜の圧電定数 d_{31} を、ダイアフラム形マイクロアクチュエータ構造を FEM によりモデル化し同定した。その結果、今回試作した複合多層 PZT 薄膜の d_{31} は約 189×10^{-12} m/V 程度であることがわかった。通常のゾルゲル PZT 薄膜の d_{31} は $90 \sim 100 \times 10^{-12}$ m/V 程度であるから、この値は従来の PZT 薄膜の約 2 倍で、PZT 薄膜としては極めて良好な値であることがわかる。この新規な複合多層 PZT 薄膜の開発により、提案しているアクティブ制御スライダがより低電圧で (10 V 以下) 実現できる技術的見通しが得られた。

5.3 アクティブ制御スライダ全体システム試作のプロセス

マイクロマシーニングプロセスで提案しているアクティブ制御スライダを作製するプロセスは概略次のようになると考えられる。

- (1) シリコンウェハ両面に SiO_2 酸化膜を形成する。
- (2) まず下部電極 (Ti/Pt) をスパッタリングで成膜し、その上に複合多層 PZT 薄膜を $2 \mu\text{m}$ 成膜する。さらにその上に上部電極 (Pt) をスパッタリングで成膜する。
- (3) ウェハの裏面から SiO_2 を RIE でエッチングして、第一段目のスライダ溝を形成する。
- (4) さらに同様にウェハ裏面から RIE でエッチングして、第 2 段目のスライダ溝を形成する。
- (5) ウェハ表面から上部電極と PZT 薄膜をエッチングしてアクチュエータを形成する。

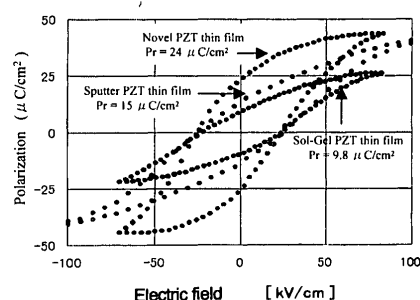


Fig. 11 P-E hysteresis characteristics for novel PZT thin films.

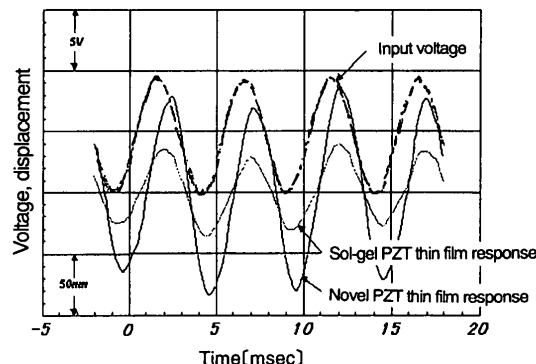


Fig. 12 Novel PZT thin films response.

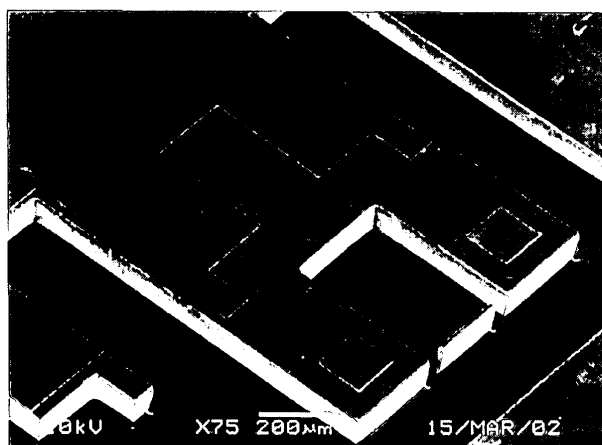


Fig. 13 SEM image for fabricated active sliders using ICP-RIE.

- (6) ウェハ裏面からカンチレバー部の厚みを実現するためにICP-RIEで深堀エッチングを行う。この時同時にスライダ外形とカンチレバー部を形成する溝部も同様の深堀エッチングをしておく。
- (7) ウェハ表面から下部電極、酸化膜、シリコンウェハの順に深堀エッチングして、スライダ外形、カンチレバー部溝部を形成し、スライダシステムとしてウェハから切り離す。

以上のようなプロセスでアクティブスライダ全体システムの作製が可能となる。Fig. 13に加工の一例として、スライダ面およびマイクロカンチレバー部を、ICP-RIE装置を用いて作製した結果を示す。全体のプロセスに対しては現在開発中であるが、技術的にはある程度見通しが立ってきている。詳細については別の機会にまた報告させていただきたいと考えている。

6. あとがき

ハードディスクにおいて10 nm以下のHDIを実現するために開発が進められている薄膜マイクロアクチュエータを利用したアクティブ制御スライダの現状について展望した。常に連続的に(continuous)10 nm以下の超微小すき間を維持するパッシブなコンタクトスライダ技術と従来のスライダ浮上技術を併用しながら必要なときのみ

(on demand)マイクロアクチュエータにより超微小すき間状態に制御するアクティブ制御スライダ技術とで設計コンセプトは大きく異なるが、その実現のための根底となる基盤技術は共通で、いわゆる「ナノテクノロジー」であろう。したがって次世代の超高密度情報記憶に必要なナノメートルHDIの開発はまさにその「ナノテクノロジー」がその鍵を握っているといっても過言ではない。最後に本稿が今後の超高密度記憶技術の開発ならびにHDI開発に何らかの参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 多川則男: 精密工学会誌, 64, 56 (1998).
- 2) 多川則男: 精密工学会誌, 67, 1928 (2001).
- 3) C. E. Yeak-Scranton: *IEEE Trans. Magn.*, 22, 1011 (1986).
- 4) R. C. Hendriks: Proc. JAPAN ITC NAGOYA 90, III, 1611 (1990).
- 5) N. Tagawa *et al.*: Extended Abstract of 11th Annual Symp. on Information Storage and Processing Systems (2000), p. 51.
- 6) 鈴木健司ほか: IIP2001 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No. 01-8 (2001), p. 20.
- 7) F. Chen *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, 37, 1915 (2001).
- 8) P. Mächtle *et al.*: Technical Digest of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (2001), p. 196.
- 9) 栗田昌幸ほか, 日本機械学会第2回機素潤滑設計部門講演会講演論文集, No. 02-12 (2002), p. 227.
- 10) 北村健一ほか: IIP2002 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No. 02-13 (2002), p. 70.

(2002年4月15日受理)



多川則男 たがわ のりお

昭50 東北大学大学院修士課程修了, 同年 日本電気(株)入社, ハードディスクやインクジェットプリンタ, ロボティクスなどのマイクロメカトロニクスに関する研究開発に従事, 平9 4月より関西大学教授, 平12 U.C. Berkeley Visiting Scholar. 専門: 情報機器・MEMSのマイクロ・ナノテクノロジー (工博)