2 方向動作静電アクチュエータ

学生員 中 村 滋 男 (東京大)

正 員 藤 田 博 之 (東京大)

On a Bi-directional Driving Electrostatic Actuator
 Shigeo Nakamura, Member (The University of Tokyo)
 Hiroyuki Fujita, Member (The University of Tokyo)

We propose a bi-directional driving electrostatic actuator which has multiple parallel plate electrodes. The actuator generates a large force that is twice as much as the force of a conventional uni-directional driving actuator. In this paper, we describe the driving theory and its experimental verification. To verify the driving theory, a micro actuator is fabricated by a reactive ion etching process with an piece of SOI wafer. The experimental results on a voltage-displacement curve and a resonance agree with the theoretical calculation results. We also propose the modified driving method to increase the sensitivity around 0-displacement. According to this study, we can conclude that a bi-directional driving electrostatic actuator is very useful for driving optical switches, magnetic head elements of hard disk drives and so on.

キーワード: マイクロマシン, 静電アクチュエータ, 平行平板型アクチュエータ, 2 方向動作

1. まえがき

複数の平行平板型静電アクチュエータを並列に接続した平行平板列型静電アクチュエータは,

- サブミリサイズのアクチュエータの中では発生力が多い。
- 消費電力が小さい。
- ヒステリシスや漏洩磁束を発生しない。
- 構造を簡単にできる。

などの理由から, 磁気ディスク装置の2 ステージサーボ用微動アクチュエータ [1] [2] [3] や光ファイバ切り替えスイッチ用アクチュエータ [4] として有望視されている。

本論文では, 可動部が一方に引きつけられる1 方向動作静電アクチュエータに比べ, 同一印加電圧での変位が2 倍以上になる2 方向動作静電アクチュエータを提案する。次に, 提案したアクチュエータの動作原理の実験的検証について報告する。最後に, 電圧-変位特性の非線形性を改善する方法について提案する。

2. 2 方向動作静電アクチュエータの動作原理

図1に1 方向動作静電アクチュエータと2 方向動作静電アクチュエータの模式図を示す。

1 方向動作静電アクチュエータの可動部は印加電圧 V に

より矢印の方向に動作する。このときの変位 x と V の関係を (1) 式に示す。2 方向動作静電アクチュエータでは, 可動部は印加電圧 V_A により A 方向に動き, V_B により B 方向に動く。 V_A により発生する変位を正とした印加電圧と変位の関係を (2) 式に示す。

$$x = \frac{\epsilon ph}{2k} \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V^2 \dots \dots \dots (1)$$

$$x = \begin{cases} \frac{\epsilon ph}{2k} \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V_A^2 & (V_A \geq 0, V_B = 0) \\ -\frac{\epsilon ph}{2k} \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V_B^2 & (V_A = 0, V_B \leq 0) \end{cases} \dots \dots (2)$$

ここで図1に示した記号以外は, ϵ が誘電率, h がアクチュエータの高さ (図1の紙面垂直方向), n はアクチュエータを一方に動作させるときに駆動力を発生する平行平板数, k はバネ部の動作方向のばね定数である。

可動部をフルストローク $L(\pm 0.5L)$ 動作させる場合, 1 方向動作静電アクチュエータでは, 1 方向への吸引により

図1 アクチュエータの模式図
Fig. 1. 2 types of actuators.

L だけ動かす必要があるが、2方向動作静電アクチュエータでは、片側に $0.5L$ ずつ動かせば良い。 g_1 の $2/3$ 以下に可動部の電極と固定部の電極が近づくと、電極通しが吸着してしまうので、 g_1 は動作ストロークの3倍以上にする必要がある [5]。従って、2方向動作静電アクチュエータの g_1 は、1方向動作静電アクチュエータの $1/2$ にすることができる。一方、2方向動作静電アクチュエータの n は、1方向動作静電アクチュエータの約 $1/2$ である。(1) 式、(2) 式より、 x は概ね n に比例し、 g_1 の2乗に反比例するので、2方向動作静電アクチュエータの x は、同一の印加電圧に対する1方向動作静電アクチュエータの約2倍になる。また、ある一定の x に対して、2方向動作静電アクチュエータの印加電圧は、1方向動作静電アクチュエータの約 $1/\sqrt{2}$ である (表1)。表1の $\{ \}$ 内は、1方向動作静電アクチュエータの値を1としたときの相対値を示してある。

3. 動作原理の検証

動作原理の検証を行うため、表2に示す寸法のアクチュエータを SOI (Silicon On Insulator) ウェハを加工し、作製した (図2)。プロセスチャートを図3に示す。
(a) まず、窒化シリコン膜 (Si_3N_4) を成膜する。
(b) 次に、表 (図中上) 側の Si_3N_4 をバッファードフッ酸 (BHF: Buffered HF) で除去し、クロムを成膜、パターニングする。このクロムが、反応性イオンエッチング (RIE: Reactive Ion Etching) のマスクとなる。
(c) 六ふっ化硫黄 (SF_6) 系ガスをを用いた RIE で、SOI を異方的にエッチングする。酸化シリコン (SiO_2) 膜をエッチ

表1 アクチュエータの発生力

Table 1. Generation force of both actuators.

	2方向動作	一方向動作
g_1	$1.5 L$	$3 L$
n	$m/2$	m
$x \approx an \left(\frac{V}{g_1} \right)^2$	$\frac{1}{4.5} \left[am \left(\frac{V}{g_1} \right)^2 \right]$ { 2 倍 }	$\frac{1}{9} \left[am \left(\frac{V}{g_1} \right)^2 \right]$
$V = \sqrt{\frac{x}{an}} g_1$	$\frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{x}{an}} L$ { $1 / \sqrt{2}$ 倍 }	$3 \sqrt{\frac{x}{an}} L$

$\$a$: 係数 m : 電極総数

表2 アクチュエータの諸元

Table 2. Size and material property of the actuator.

m : 電極総数	7
n : 実効電極数	4
h : アクチュエータ高さ	$15 \mu\text{m}$
p : 電極長さ	$200 \mu\text{m}$
w : バネ部幅	$5.5 \mu\text{m}$
q : バネ部長さ	$245 \mu\text{m}$
g_1 : フロントギャップ	$6 \mu\text{m}$
g_2 : バックギャップ	$14 \mu\text{m}$
ヤング率	160 GPa

ストップとして用いる。

- (d) 裏 (図中下) 面の Si_3N_4 を RIE でパターニングする。
- (e) 表面を治具で保護し、裏面を水酸化カリウム水溶液 (KOH) でエッチングする。シリコンを $10 \mu\text{m}$ 程度残して、エッチングを止める。
- (f) (e) で残したシリコン (Si) を、 SF_6 ガスをを用いた RIE でエッチングする。
- (g) 最後に、 SiO_2 膜を BHF でエッチングし、アクチュエータ可動部をリリースする。

(e)(f) と2段階で裏面からの貫通穴を開けるのは、KOH のエッチストップに SiO_2 膜を用いると、工程 (c) でのダメージや KOH の水圧により SiO_2 膜が破壊される確率が高いので、それを防ぎ、歩留まりを上げる為である。

印加電圧-変位特性を図4に示す。印加電圧の負の値は V_B を示している。計算値と実験値はよく一致しており、(2) 式に示した動作原理の検証を行うことができた。

また、1次の共振周波数も計算値の 30.9 kHz に対して実測値 30.2 kHz とよく一致しており、図4の計算に用いた材

図 2 試作アクチュエータ

Fig. 2. An SEM image of an actuator.

図 3 プロセスチャート

Fig. 3. Process chart.

料の物性値等が妥当であることを裏付けている。

4. 0 変位付近の感度と非線形性の改善

図 4 に示した、印加電圧－変位特性は、変位 0 付近の感度が悪く、大きな非線形特性を持っている。上記問題点を解決するため、駆動電圧 (V_A, V_B) をバイアス電圧 (V_0) に大

図 4 印加電圧－変位特性 (計算式の検証)

Fig. 4. Applied voltage - displacement curve (verification of calculation).

きさが同じで符号の違う制御電圧 (V) を加えたものにすることを提案する。すなわち (2) 式において、 $V_A = V_0 + V$ 、 $V_B = V_0 - V$ とし、両方の差をとったものとする ((3) 式)

$$x = \frac{\varepsilon p h}{2k} \left[\left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} (V_0 + V)^2 - \left\{ \frac{n}{(g_1 + x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 - x)^2} \right\} (V_0 - V)^2 \right] \dots (3)$$

この方法は、櫛歯型の静電アクチュエータの線形化に用いられている [6]。 g_1, g_2 に比べ x が極めて小さい 0 変位付近では、櫛歯型の静電アクチュエータの線形化と同様に x が V に比例し、感度 (x/V) は V_0 が大きいほど高くなる ((4) 式)。

$$x = \frac{2\varepsilon p h}{k} \left\{ \frac{n}{g_1^2} - \frac{n-1}{g_2^2} \right\} V_0 V \dots (4)$$

x が、 g_1, g_2 に対し無視しえない程の大きさになると、次第に、(4) 式からはずれて来る。印加電圧－変位特性 (計算値) をバイアス電圧を用いない場合と合わせて、図 5 に示す。

前述のごとく、櫛歯型の静電アクチュエータのように、完全な線形化はできていないが、変位 0 付近の感度および線形特性が改善されている様子がわかる。具体的には、変位 $0.5 \mu\text{m}$ を得るのに必要な電圧は、バイアス電圧を用いない場合 65.8V であったのに、バイアス電圧が 60V の場合 15.3V、バイアス電圧が 80V の場合 8.1V となり、感度でそれぞれ約 4 倍、約 8 倍になっている。

g_1, g_2 を所望の変位に比べ十分大きくとることによりほぼ、(4) 式示した様な線形化も可能である [3]。

図 5 印加電圧－変位特性（バイアス電圧による線形性改善）

Fig. 5. Applied voltage - displacement curve (improve linearity by bias voltage).

5. まとめ

本研究では、2方向動作静電アクチュエータを提案し、その動作原理の検証を行った。2方向動作静電アクチュエータは、従来の1方向動作静電アクチュエータに対し、同一印加電圧における変位（発生力）を2倍以上にすることが可能である。また、このアクチュエータは、ギャップ寸法に対して十分小さい微小変位領域において、変位を印加電圧にほぼ比例させることができる。光スイッチや磁気ディスク装置用マイクロアクチュエータとして、有望である。

謝辞

SOI ウェハをご提供いただいた信越化学工業株式会社 片山正健氏、本研究を助成していただいた情報ストレージ研究推進機構に深い謝意を表す。また、種々のご議論をいただいたLIMMS/CNRS および藤田研究室の諸氏に感謝する。

（平成9年4月28日受付）

文 献

- (1) T.Imamura, T.Koshikawa and M.Katayama: "Transverse Mode Electrostatic Microactuator for MEMS-Based HDD Sliders", Proc. of IEEE the 9th Annual Int. Workshop on MEMS, San Diego, U.S.A., p216 (1996,2).
- (2) S.Nakamura and H.Fujita: "An Electrostatic Micro Actuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drives", Proc. of the 3rd France-Japan / 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, Besancon, France, 2, p778 (1996,11)
- (3) D.A.Horsley, A.Singh, A.P.Pisano and R.Horowitz: "Angular Micropositioner for Disk Drives ", Proc. of IEEE the 10th Annual Int. Workshop on MEMS, Nagoya, p216 (1997,1).

- (4) E.Ollier, P.Labeye and F.Revol: "A Micro-opt-mechanical Switch Integrated on Silicon for Optical Fiber Network", DIGEST IEEE/LEOS 1996 Summer Topical Meetings, Keystone, U.S.A., p71 (1996,8)
- (5) 藤田博之: マイクロマシンの世界, 工業調査会, p182 (1992,5)
- (6) L.-S.Fan, H.H.Ottesen, T.C.Reiley and W.Wood : "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-Based, Two-Stage Servo System", IEEE Trans. on Industrial Eng., 42-3, p222 (1995,6)

中村滋男

（学生員）昭和35年6月24日生。昭和60年3月広島大学大学院工学研究科設計工学専攻博士課程前期修了，工学修士。平成6年10月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程入学，在学中。昭和60年4月（株）日立製作所入社，現在に至る。マイクロマシンの実用化研究に従事。

藤田博之

（正員）昭和27年12月13日生。昭和50年3月東京大学電気工学科卒業。52年3月同大学院にて工学修士，55年3月工学博士。同年4月より東京大学生産技術研究所講師，助教授を経て，平成5年8月より同教授。主としてマイクロメカトロニクスの研究に従事。