分割した櫛歯電極型静電駆動アクチュエータ

正 員 佐々木 実* 非会員 坊野 史典* 正 員 羽根 一博*

Electrostatic Actuator with Segmented Comb Electrodes

Minoru Sasaki*, Member, Fuminori Bono*, Non-member, Kazuhiro Hane*, Member

The comb drive actuator with segmented electrodes is fabricated for realizing the large displacement. The counter torque generated by applying the higher driving voltage at a segmented electrode can suppress the instability, called “side snap-over”. The stable travel is confirmed to extend by 4-6 μm . The obtained maximum displacement is 50 μm .

キーワード：櫛歯電極型アクチュエータ，不安定動作

Keywords：Comb drive actuator, Side snap-over

1. はじめに

静電駆動マイクロアクチュエータは消費電力と発熱を少なくできるため，デバイスの集積度が高い応用において特に魅力的となる。櫛歯電極型アクチュエータによって数10 μm を越える変位を得るには工夫が必要になる⁽¹⁾。プローブ顕微鏡応用高密度データストレージ⁽²⁾のための記録メディア走査用アクチュエータの場合，プローブ間隔100 μm 程度の変位が一つの目標となる。最大変位を決定する主要因になるのは，変位方向のつりあいよりも，垂直方向に発生してしまう，可動櫛歯が固定櫛歯側のどちらか片方に吸着する side snap-over と呼ばれる不安定動作になる。

櫛歯の配置にわずかな非対称性があつた場合，櫛歯の両側で平衡を保つべき静電引力に差ができてしまい，引力の強い片方に引き寄せられてしまうからであると説明される。この非対称性は製作プロセスのユニフォームリティ不足によって生じると考えられるが，SOI (silicon-on-insulator) ウェハ中に含まれる圧縮応力が，移動体のリリース後に平衡点をデザイン通りの位置からずらす回避困難な要因も含まれる⁽³⁾。Side snap-over は移動体全体で見ると，面内回転を発生することが多い。かつ同じデバイスであれば，常に同じ方向に発生することが観察される。

本研究では，予め櫛歯電極を複数に分割しておき，面内回転を打ち消す方向にトルクを発生できるようにした，静電駆動アクチュエータについて述べる。

2. デバイスと実験

図1(a)に製作したアクチュエータを示す。移動体周辺は電位の同じ構造体で囲い，櫛歯部分以外に働く力を十分小さくした。図1(b)に主要な寸法を示す。左右 X 軸方向に関し

図1 (a)アクチュエータ全体図と(b)主要寸法

Fig. 1. (a) Whole view and (b) dimensions of fabricated actuator.

ては非共振での，上下 Y 軸方向は共振での動作とした。X 軸に関しては1方向のみで100 μm の変位を実現するのを避け， $\pm 50\mu\text{m}$ の2方向に分けた。サスペンションは真直，斜め，pre-bent 形状の folded-flexure 二重梁からなる^{(4)~(6)}。3種の梁の中では pre-bent 形が最大変位を示した。XY2 軸の駆動のための電気配線を実現するために，一度エッチングした溝に絶縁体であるノンドープシリコンをエピタキシャル成長させた。後のプロセスはシリコンドライエッチング

* 東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01
Dept. of Nanomechanics, Tohoku University,
Aza Aoba 6-6-01, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579

図2 駆動電圧－変位特性

Fig. 2. Displacement-driving voltage curves.

と犠牲層エッチングによるリリースである。振幅 20V の 230Hz 正弦波の共振駆動時に 80μm の Y 軸変位を得た。

図 1(a) X 軸右側への駆動には 3 つの櫛歯電極が利用できる。中央の移動体周辺に上下中心軸を挟んだ 2 つの電極に各々 25.5 対の櫛歯がある。0.5 は固定櫛歯が 1 本多いことを示す。もう 1 つは右端にある 93.5 対の櫛歯である。これら 3 電極に別々の駆動電圧 V_{x1} , V_{x2} , V_{x3} を印加することで、移動体に対してモーメントの向きが異なる力を発生できる。Side snap-over によって生じる回転と反対方向のトルクが発生するよう $V_{x1}=kV_{x2}$ の比例関係を保って電圧印加した。係数 k は最大変位が大きくなるよう実験的に決定した。

3. 結 果

$V_{x1}=V_{x2}$ で内側 2 電極の櫛歯に、 V_{x3} のみで外側の櫛歯に電圧印加した場合の変位－駆動電圧特性の典型例を図 2 に示す。静電引力に比例する V^2 を横軸に取った。原点を通るほぼ比例関係が得られる。櫛歯数に 93.5 : 51 の差があるため、外側の櫛歯を利用した方が、より低電圧駆動になる。傾きの比率は 0.0085 : 0.0041 μm/V² と対応する。Side snap-over が発生する直前の最大変位を比べると、外側の櫛歯で駆動すると 43 μm (このとき 5041 V²)、内側では 45 μm (11025 V²) と 2–4 μm の差が生じた。個々の櫛歯に働く静電引力は、内部櫛歯の方が約 2 倍大きいにも関わらず、side snap-over し難いことが分かる。外側に対する内側櫛歯駆動時の V^2 の比率は 2.0–2.9 であった。内側に比べ、外側の櫛歯は移動体中心から離れているので回転モーメントを発生し易いと考えられる。移動体中心からみた幾何学的な配置は、約 1.8 倍離れている。平行平板電極と言われる初期ギャップの 1/3 に相当する安定動作範囲の回転角を考えると、回転中心は図形中心よりも駆動櫛歯側に寄ったと考えられる。また、内側と外側櫛歯を同時に $V_{x1}=V_{x2}=V_{x3}$ で駆動した場合、更に低電圧駆動となるが、side snap-over は内側のみと外側のみで生じた電圧値の間になった。低電圧化は安定動作領域を広げるが、電極配置の効果は平均化されると考えられる。

表 1 に $V_{x1}=V_{x2}$ と $V_{x1}=kV_{x2}$ の条件で駆動させた場合の side snap-over 直前で得た最大変位 X_{max} の 8 例を示す。No.1–4 では 4–6μm 変位を伸ばすことが出来た。実験した全てのデバイスについて本駆動方法が有効であったのではなく、No.5–8 のように変わらないものもあった。片側電極のみに

表 1 分割した駆動電極に印加した電圧と最大変位
Table 1. Applied voltages (V_{x1} , V_{x2}) at segmented electrodes and obtained maximum displacements (X_{max}).

No.	V_{x1} (V)	V_{x2} (V)	X_{max} (μm)	No.	V_{x1} (V)	V_{x2} (V)	X_{max} (μm)
1	105		45	5	104		50
	98	112	50		146	0	49
2	106		42	6	0	147	49
	79	123	46		95		48
3	110		42	7	132	0	49
	121	85	48		0	132	48
4	108		43	8	96		41
	81	122	48		132	0	40
					0	132	40
					103		49
					141	0	48
					0	141	49

電圧を印加した場合でも、side snap-over の向きは変化しなかった。移動体の回転には櫛歯の変位方向の移動が伴い、回転中心に対して反対側では櫛歯の動きが反対となるため、エネルギーのやりとりは逆になる。分割した電極によって得られるこの効果は比較的弱いものであって、面内で一様に櫛歯が偏った場合には、移動体の回転方向を逆にするには至らなかったと考えられる。より積極的には、固定櫛歯と可動櫛歯を互いの間に配置するのではなく、分割した 2 電極で反対方向に偏りを加えることも検討できる⁽⁷⁾。

4. おわりに

櫛歯電極を分割した静電駆動型アクチュエータを製作した。配置できる櫛歯数が少なくなるため駆動電圧が高くなるものの、内側への電極配置が最大変位を大きくするには有利であること、side snap-over と共に生じる移動体の回転を打ち消す方向にモーメントを発生する櫛歯電極の駆動方法が最大変位を伸ばす効果があることを確認した。この効果は比較的弱いものであった。本デバイスでは X 軸片側方向で最大 50μm の変位を得た。

(平成 17 年 7 月 26 日受付)

文 献

- (1) 小西 聡・福根恵一郎：「多段櫛歯型静電アクチュエータによる連鎖動作」、電学論 E, Vol.122, No.12, pp.573-574 (2002-12)
- (2) P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, U. Durig, B. Gottmann, W. Haberle, M. A. Lantz, H. E. Rothuizen, R. Stutz, and G. K. Binnig: "The "millipede" - nanotechnology entering data storage" *IEEE Trans. Nanotechnology*, Vol.1, No.1, pp.39-55 (2002-1)
- (3) K. Isamoto, K. Kato, A. Morosawa, C. Chong, H. Fujita, and H. Toshiyoshi: "A 5-V Operated MEMS Variable Optical Attenuator by SOI Bulk Micromachining", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.10, No.3, pp.570-578 (2004-3)
- (4) R. Legtenberg, A. W. Groeneveld, and M. Elwenspoek: "Comb-drive actuators for large displacements", *J. Micromech. Microeng.* Vol.6, No.3, pp.320-329 (1996)
- (5) J. D. Grade, H. Jerman, and T. W. Kenny: "Design of Large Deflection Electrostatic Actuators", *J. MEMS*, Vol.12, No.3, pp.325-343 (2003)
- (6) G. Zhou and P. Dowd: "Tilted folded-beam suspension for extending the stable travel range of comb-drive actuators", *J. Micromech. Microeng.* Vol.13, No.2, pp.178-183 (2003)
- (7) H. Obi, T. Yamanoi, H. Fujita, and H. Toshiyoshi, "A Vertical-Comb Torsion Mirror with Distributed Gaps for Suppressing In-Plane Instability", *Proc. IEEE/LEOS Optical MEMS*, pp.60-61 (2004)