表面弾性波を用いた摩擦駆動システムの耐久性に関する研究

Durability of Friction Drive System Using Surface Acoustic Wave

○千葉義直(東北大学), 正 足立幸志(東北大学)

Yoshinao CHIBA, Koshi ADACHI

Tohoku University, Aramaki-Aza-Aoba 6-6-01, Aoba-ku, Sendai 980-8579

1. 緒言

表面弾性波 (SAW: Surface Acoustic Wave) の一種であるレイリー波が弾性体を伝播するとき, 表面の一点は楕円軌跡を描く。この表面の楕円軌跡により, 接触した固体に与えられる摩擦力を駆動力とするアクチュエータが SAW モータである。SAW モータの駆動周波数は MHz オーダであり, 通常の超音波モータよりも 2 桁高く, また, 駆動振幅は nm オーダであるため SAW モータは高速かつ高精度な次世代アクチュエータとして期待されている⁽¹⁾。しかし, 駆動特性が徐々に低下し駆動不能になることが報告されており, 実用化のためには耐久性の向上が急務の課題となっている。

本研究では, 後述する 2 つの実験手法を新たに導入することにより SAW モータの駆動力が徐々に低下し駆動不能に至る機構を解明する。さらに得られた駆動力低下機構に基づいて, SAW モータの耐久性の向上を実現するための駆動表面を提案する。

2. SAW モータの駆動原理

Fig. 1 に SAW モータの基本構造を示す。SAW モータはステータとスライダの二つの要素から構成される。ステータはニオブ酸リチウム (LiNbO_3) の基板 ($62 \times 13.6 \times 1 \text{ mm}$) の両端にすだれ状電極 IDT (Inter-digital Transducer) を取り付けられた構造を有する。本実験では周波数 9.61 MHz, 周期が $400 \mu\text{m}$ となる IDT を設計した。 LiNbO_3 におけるレイリー波の伝播速度は約 4000 m/s である。スライダは 1 辺 2 mm の正方形に切り出したシリコンウエハを用いた。

Fig. 2 に SAW モータの駆動原理を示す。ステータ上の IDT に高周波電圧を印加することによりステータ表面にレイリー波を伝播させる。これにより発生するステータ表面の楕円運動に押し付けられたスライダは, 摩擦力を介し駆動される。

Fig. 1 A schematic illustration of the SAW motor

Fig. 2 A schematic illustration of the driving mechanism of the SAW motor

3. 実験方法

本実験では周波数 9.61 MHz, 電圧 $200 \text{ V}_{\text{p-p}}$ のサイン波形電圧 150,000 波を 1 秒おきに IDT に印加し, スライダを断続的に駆動させるバーストステップ駆動方式を用いた。150,000 波での駆動を 1 ステップと定義し, 駆動不能になるまでの耐久実験を行った。ただし, 2000 ステップまで駆動が継続した場合, その時点で実験を終了とした。スライダを押し付ける力 (予荷重) は $2.0 \sim 13.7 \text{ N}$ の範囲で変化させた。

本研究では駆動不能にいたるまでの駆動力の変化を 20 ステップごとに測定するとともに, 新たに導入した「摩擦駆動面その場観察手法」を用いて駆動面の変化を観察した。

4. 実験結果

耐久実験における駆動力の変化の例を Fig. 3 に示す。いずれの条件においてもステップ数の増加に伴い駆動力はほぼ一定の割合で減少しほとんどの実験条件では停止に至ることがわかる。また 1 ステップにおける駆動力の減少割合を駆動力低下率と定義すればこの値により耐久性を評価できることが分かる。

一方, Fig. 4 に試験後のスライダ表面に観察される付着膜の SEM 像 (a) 及びその表面の AFM 像 (b) を示す。摩擦駆動中に発生した数 10 nm オーダの摩耗粒子が凝集することによりスライダ表面に付着膜を形成していることが分かる。さらに本研究で導入した「摩擦駆動面その場観察」により, 駆動面に存在する付着膜量の増加に伴い, 駆動力低下率が増加することが明らかにされた。

そこで, 次節では付着膜の形成されたスライダとレイリー波の伝播するステータの接触モデルを導入することにより SAW モータの駆動力低下機構を考察する。

Fig. 3 Representative driving properties of the SAW motor

Fig. 4 SEM image of the slider surface (a) and AFM image of the adherent layer on the slider (b)

Fig. 5 Contact condition between the adherent layer on the slider and the bottom area of Rayleigh wave on the stator

Fig. 6 A schematic configuration of the experimental system to evaluate braking force generated at the contact interface

5. 考察

5.1 SAW モータの駆動力低下機構

スライダ表面の付着膜の直下にステータ上を伝播するレイリー波の波低部分があるときの接触モデルをFig. 5に示す。この接触点におけるステータの速度の水平方向成分はスライダの速度より小さいため、接触点では駆動する際の抵抗（ブレーキ力）となる。すなわちSAWモータにおいてはスライダの速度より遅い水平方向成分を有するステータ部分との接触の増加が駆動力低下を意味すると考えられる。

そこでFig. 6に示す「摩擦駆動中のすべり摩擦実験」を併用することにより、SAWモータ駆動中に発生するブレーキ力の変化を定量的に測定した。算出したブレーキ力と駆動力の関係をFig. 7に示す。SAWモータの駆動力の低下はブレーキ力の増加によるものであることが分かる。よってブレーキ力の抑制が優れた耐久性を持つSAWモータ創出の鍵を握る。

5.2 耐久性向上のための駆動表面

優れた耐久性を有するSAWモータのための駆動表面として以下の2つを提案し実証試験を行った。

(i) 摩耗粒子が発生しにくい十分にならしを行った表面

スライダに形成される付着膜はステータの摩耗粒子により構成されることが確認された。そこで1枚のスライダにおいて2000ステップまで連続駆動させ、それを5回行うならし方法を用いることにより十分に摩耗させたステータを耐久性に優れた駆動表面として提案する。

(ii) 摩耗粒子の介在抑制のためのテクスチャを施した表面

スライダに形成される付着膜厚さは数10nmであることが確認された。そこでその付着膜の駆動部への介在を抑制するために高さ500nm、直径5μmの円柱突起を20μm置きに配置したテクスチャを施したスライダを耐久性に優れた駆動表面として提案する。

Fig. 8に2つの表面を用いた場合の駆動力低下率を示す。十分にならしを行ったステータ表面を用いることにより、駆動力低下率は 1.6×10^{-3} N/step から 1.7×10^{-5} N/step へと約100分の1に抑え得ることが確認された。

Fig. 7 Decrease in driving force by increase in braking force

Fig. 8 Improvement of durability of the SAW motor with using the stator after well running-in and the slider with texturing

一方、テクスチャを施したスライダ表面を用いることにより、ならしを施すことなく駆動力低下率は 1.6×10^{-3} N/step から 1.1×10^{-4} N/step へと10分の1以下に抑え得ることが確認された。

6. 結言

LiNbO₃のステータとSiのスライダからなるSAWモータの繰り返し駆動試験において「摩擦駆動面のその場観察手法」及び「摩擦駆動中のすべり摩擦実験」を導入することにより駆動力低下機構を明らかにした。また、この結果に基づき優れた耐久性を実現する駆動表面を提案し、それらが効果的であることを実証した。以下に具体的な結論を示す。

- SAWモータの駆動力の低下は、駆動中に発生した摩耗粒子の介在によるブレーキ力（スライダの速度より遅い水平方向成分を有するステータ部分との接触により発生する摩擦抵抗）が増加によって生じることを明らかにした。
- 今回導入したならし方法を施したステータを用いることで駆動力低下率を 1.6×10^{-3} N/step から 1.7×10^{-5} N/step へと約100分の1に抑え得ることを示した。
- 高さ500nm、直径5μmの円柱突起を20μm置きに配置したテクスチャを有するスライダを用いることにより、ならしを施すことなく駆動力低下率を 1.6×10^{-3} N/step から 1.1×10^{-4} N/step へと10分の1以下に抑え得ることを示した。

参考文献

- Minoru Kurosawa, Masakazu Takashi, Toshio Higuchi, Friction Drive Surface Acoustic Wave Motor, Ultrasonics, 34 (1996) 243-246.