静電浮上リニア駆動機構

正員 Ju JIN (KAST) 正員 樋口 俊郎 (東京大学、KAST)

Direct Electrostatic Levitation and Propulsion

Ju JIN, Member (Kanagawa Academy of Science & Technology)

Toshiro HIGUCHI, Member (University of Tokyo, Kanagawa Academy of Science & Technology)

A new type of mechanism featuring "Direct Electrostatic Levitation and Propulsion" (DELP) has been successfully developed. It can directly levitate and drive an object using electrostatic forces. A 3.5-inch diameter aluminum hard disk media has been suspended and transported. In this paper a brief review of the basic principle of the direct electrostatic levitation and propulsion is presented, followed by a description of the structure of the prototype DELP mechanism, including electrode design, position feedback control method for levitation, driving principle and the operational procedure. Experimental results which confirm the completely contactless levitation and propulsion are also presented.

キーワード： 静電浮上、静電駆動、HDDメディア、リニアモータ、非接触搬送、真空メカトロニクス

1. まえがき

半導体デバイスやLCDなどの製造工程において、塵埃微粒子汚染が製品の歩留まりを左右する主な原因になっている。接触・摩擦による帯電およびそれに伴う塵埃微粒子の付着と発生を抑制するために、ウェハやガラス基板などの非接触搬送が望まれる。また、新しい材料の創製や表面・界面の研究において、接触による試料と支持体との間の電子やイオンの交換を防ぐため、試料を非接触状態で保持・搬送する必要がある。

現在、ウェハやガラス基板などの搬送装置の主流は接触式である。例えば、半導体製造プロセスにおいて、製造工程間におけるシリコンウェハの搬送は主にロボットによって行われている⁽¹⁾。シリコンウェハがロボットハンドの上に直接に置かれているため、接触部ができてしまう。こうした接触部には帯電が起これ、半導体不良の原因となる塵埃微粒子が集まる。また、磁気浮上搬送システムが次世代の搬送系として期待されているが⁽²⁾、磁力によってシリコンウェハなどの半導体材料を直接に浮上することは不可能なため、ウェハを磁気浮上された載置台に乗せる必要があり、ウェハと載置台との間に接触部ができてしまう。その他の搬送手段として、空気浮上搬送や超音波浮上搬送があるが^{(3), (4)}、これらは、真空環境下での使用が不可能である。

本論文は、超高真空・超清浄空間にも応用可能な非接触搬送システムの開発の第一歩として、静電気の力を利用して被搬送体を宙に浮かせ、周囲環境と完全に無接触状態にして搬送する静電浮上リニア駆動機構を提案するとともに、プロトタイプによる3.5インチのアルミディスクの非接触搬送実験について報告する。

静電気を利用する場合には、次の2つの問題が最も心配さ

れる。(1)被搬送体が帯電してしまい、雰囲気中の塵埃微粒子を被搬送体の表面に集める。(2)浮上用の静電場が被搬送体に対して静電破壊などのダメージを与える。

帯電及びそれに伴う塵埃の集まりを防ぐ方法として、本研究の静電浮上リニア駆動機構は、被搬送体の表面電位そのものを抑制する方法をとった。具体的には、等面積の浮上用電極を偶数個配置するとともに、電極には均等に正電圧と負電圧を印加することにより、被搬送体の電位を常にゼロボルトの近くに保つようにした。

静電浮上リニア駆動機構をシリコンウェハの非接触搬送に応用する場合に、浮上用の電界によるウェハ表面の素子の静電破壊を避けなければならない。次のようにウェハを配置すれば、この問題が解決できると考えた。デバイスが加工されるウェハの表面を下向きにし、ウェハの裏面を浮上用電極と対向させ、浮上用電界がウェハの表面の素子に影響を及ぼさないようにする。その原理は図1に示される。図1において、浮上用の電極1と2は等面積であり、それぞれに等量異符号の電圧が印加されている。浮上ギャップと比べ、電極の面積が十分に大きく、平行導体板コンデンサと同様に、電極の電荷もウェハ上に誘導された誘導電荷も内面にのみ分布し、ウェハの表面には電界は存在しない。シリコンウェハ用の双極方式静電チャック⁽⁵⁾もこの原理を利用していると言える。

2. 静電浮上リニア駆動機構

<2.1> 装置の構成 筆者らが試作した静電浮上リニア駆動機構の概略構成を図2に示す。機構全体は下記の6つの部分から構成される。

(1) 浮上兼駆動用電極プレート：浮上力及び駆動力を発生する。

Fig. 1 Electric charges distribution. When the overlapping area of the electrodes and the wafer is large enough compared to the gap: (1) Electric charges distribute only on the inside surface, and the potential of wafer is kept at zero volt; (2) Electric field occurs only at the gap, devices on the wafer surface are not affected by the levitation electric field.

Fig. 2 Schematic of DELP mechanism

(2) アルミディスク：搬送の対象であり、パソコンなどのハードディスクドライブ（HDD）のメディア基板である。外径は95mm、内径は25mm、厚さは0.775mm、重さは14グラムである。

(3) 変位センサ（4個）：電極とアルミディスクとのギャップを測定する。

(4) PDコントローラ（3台）：電極への印加電圧を制御する。

(5) 高電圧アンプ（4台）：コントローラの出力を増幅する。

(6) 駆動ユニット：電極へ電圧を印加し、そのシーケンスを制御する。

浮上兼駆動用電極プレートの形状と寸法を図3に示す。プレートは絶縁性のガラスエポキシ基板からなり、その上に幅2mmの分離帯を挟んで2組の銅箔電極ユニットが上下に形成されている。各電極ユニットには幅4mmのストリップ状電極が0.5mmの間隔で26本形成されている。電荷の集中を防ぐため、各電極の角部が丸くなっている。

電極プレートには4つの変位センサ用の穴が図示の位置で開いている。4つの変位センサがそれぞれの穴に固定される。

また、浮上および駆動時におけるディスクの横ずれを抑えるため、基板の中央にはディスクの穴に対応した長円形

Fig. 3 Electrode pattern

Fig. 4 Integrated control strategy

の無電極ゾーンを設けるとともに、電極部分全体の幅をディスクの外径と同一にしてある。

< 2. 2 > 静電浮上原理 搬送対象であるアルミディスクを浮上して水平に保つには、ディスクの持つ6つの運動自由度のうち、5つを制御しなければならない。この5つは、ディスクの水平面内の運動（2つの自由度）、重力方向の運動、ピッチング運動とローリング運動（各1自由度）である。

ディスクの駆動方向と直角する水平面内の並進運動は、電極の幅がディスクの外径と同じになっているため、端部効果によって受動的に拘束されている⁽⁶⁾。駆動方向の並進運動制御は2.4節の駆動原理に述べる。残る3つの運動は図4に示す統合制御法によって能動的に制御される。

統合制御法は浮上体の姿勢および位置を制御する方法で、原理は次の通りである。

(1) 4つの変位センサより4つの観測点における電極とディスクとのギャップ（ Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 ）を測定し、それらからディスクの重力方向の位置 Z_c 、ピッチング角 θ_x とローリング角 θ_y を算出する。

(2) 位置・姿勢信号をフィードバック信号として、3つのPD（比例-微分）コントローラに入力する。PDコ

Fig.5 Relative position of electrodes and disk. For the purpose of identification, each strip electrode is considered as an element of a matrix: defining upper electrode unit as row A, and the bottom as row B, and numbering columns from left to right as 0 to 25. For example, the number of the electrode in row A, column 3 is A3.

ントローラは入力信号を目標信号と比較し、その偏差を比例-微分 (PD) 演算で処理し、3つの電圧信号 (V_z , V_r , V_p) を出力する。

(3) 電圧信号 (V_z , V_r , V_p) とバイアス電圧信号 V_e とを式 (1) のように組み合わせ、2つの正の制御電圧信号 V_{c1} , V_{c2} と2つの負の制御電圧信号 V_{c3} , V_{c4} を作りだし、4台の高電圧アンプへ出力する。

$$\begin{cases} V_{c1} = [V_e + (V_z/4 - V_r/2)] \\ V_{c2} = [V_e + (V_z/4 - V_p/2)] \\ V_{c3} = -[V_e + (V_z/4 + V_r/2)] \\ V_{c4} = -[V_e + (V_z/4 + V_p/2)] \end{cases} \quad (1)$$

(4) 高電圧アンプは入力信号を1000倍に増幅し、ディスクが目標位置に安定に浮上できるのに必要な2つの正の電圧 V_1 , V_2 と2つの負の電圧 V_3 , V_4 を出力する。

$$\begin{cases} V_1 = 1000 \times V_{c1} \\ V_2 = 1000 \times V_{c2} \\ V_3 = 1000 \times V_{c3} \\ V_4 = 1000 \times V_{c4} \end{cases} \quad (2)$$

(5) 正の電圧 V_1 , V_2 と負の電圧 V_3 , V_4 は、駆動ユニットを通して図5のようにディスクの真上にあるストリップ電極に印加する。つまり、電極A2~A11には V_1 , A12~A22には V_2 , B2~B11には V_4 , B

12~B22には V_3 を印加する。

そうすると、電極とディスクの間に静電場が生じ、ディスクには図4に示すような4つの静電吸引力 (f_1 , f_2 , f_3 , f_4) が働き、ディスクを初期位置から吸い上げ、目標位置にて無接触状態で保持される。

<2.3> 電位ゼロの原理 ディスクが水平に浮上しているとき、3つのコントローラの出力 (V_z , V_r , V_p) はすべてゼロになり、ストリップ電極に印加される電圧の総和はゼロになり、

$$\sum_{i=1}^4 V_i = 0 \quad (3)$$

ディスクの表面電位もゼロボルトになる。

<2.4> 駆動原理 ディスクを浮上した状態で駆動するには、静電場を進行方向に沿って移動させる必要がある。本研究の静電浮上リニア駆動機構は、ストリップ電極に印加する電圧のシーケンスを制御することにより、静電場を移動させる。

具体的には図5に示すように、進行方向に沿って、ディスクと重なりがなく、ディスクに最も近い電極A23に電圧 V_2 , B23に電圧 V_3 を印加する。進行方向の反対側では、ディスクと重なっている最も外側の電極A2への印加電圧 V_1 , B2への印加電圧 V_4 を切る。それと同時に、電極A12への印加電圧を V_2 から V_1 に、電極B12への印加電圧を V_3 から V_4 に切り替える。これで、静電場が進行方向に沿って1電極分 (ピッチ) だけ移動したことになり、ディスクと静電場との間に相対変位が生じた。

ディスクにはこの相対変位を無くそうとする端部効果による水平方向の静電力が働き、ディスクを引っ張り、進行方向に沿って1電極分 (ピッチ) を移動させる。この過程を繰り返すことにより、ディスクを浮上した状態で進行方向に沿って移動することができる。

3. 実験結果および考察

次に静電浮上リニア駆動機構によるHDDメディア用の3.5インチのアルミディスクの浮上、搬送実験及びその結果について説明する。

<3.1> ディスクの初期位置と姿勢 ディスクは、最初に電極プレート下部400 μm のところに、水平になるように3本のマイクロメータヘッドの上に設置される。このとき、ディスクはストリップ状電極A2~A22とB2~B22の真下にある。この位置をディスクの搬送原点とする。

<3.2> ディスクの浮上 次に、ディスクの真上の電極A2~A22とB2~B22に、図5に示すように電圧 V_1 , V_2 , V_3 , V_4 を印加し、ディスクを初期位置から吸い上げる。

過大な過度電圧による放電を防ぐため、電圧印加は2段階に分けて行った。最初に、電極A2~A11とA12~A22には0.96 kV, 電極B2~B11とB12~B

Fig. 6 Gaps change during levitation process

2 2 には -0.96 kV のバイアス電圧を印加する。次に、3つのコントローラのスイッチを同時にオンし、制御電圧を相応する電極に印加する。このとき、ディスクは静電吸引力によって持ち上げられ、図6及び図7に示す過渡応答を経て、平衡位置にて安定な浮上状態に入る。

図6にディスクが初期位置から浮上状態に入る過程において、4つの観測点（変位センサが設置されている点）における電極とディスクとのギャップ変化を示す。初期状態では、4つのギャップはそれぞれ $414, 417, 401, 385 \mu\text{m}$ であったが、安定な浮上状態に入ると、それぞれは $384, 375, 355, 352 \mu\text{m}$ に変わり、ディスクが宙に浮いていることがよく判る。

また、図6から以下のような事実も判明した。

(1) 初期状態において、4つのギャップが同じでない。初期設定ギャップ $400 \mu\text{m}$ とはそれぞれ $14 \mu\text{m}, 17 \mu\text{m}, 1 \mu\text{m}, -15 \mu\text{m}$ の差がある。これは、電極プレート全体が水平面に対して傾いていることを意味している。

(2) ディスクが浮上状態に入ったとき、目標の水平浮上（ギャップ $370 \mu\text{m}$ ）に対して、約 0.04 度傾いている。その原因は電極プレート全体が傾いているところにある。

今回の試作機において、電極プレートの水平度を調整する機構を設置しなかったため、上記の傾きを防げなかった。電極プレートの水平度調整機構を設置することにより、ディスクを水平に浮上することができると思われる。

図7に浮上過程における4つの印加電圧 (V_1, V_2, V_3, V_4) の変化を示す。ディスクが安定な浮上状態に達したとき、それぞれは $1191 \text{ V}, 1109 \text{ V}, -1178 \text{ V}, -1089 \text{ V}$ である。ディスクが水平に浮

Fig. 7 Voltages change during levitation Process

Fig. 8 Surface potential of desk during levitation process

上していれば、4つの電圧の大きさは同じになるが、ディスクが傾いているため、ばらつきが生じた。

図8に浮上過程におけるディスクの電位変化を示す。PDコントローラをオンにしてまもなく、ディスクには最大マイナス 80 ボルトの電位が現れたが、安定な浮上状態に入ると、残留電位が約 30 ボルトになった。ディスクが水平に浮上していれば、残留電位がゼロボルトになるはずだが、ディスクが傾いているため、上の結果になってしまった。この問題も電極プレートを水平に調整することで解決できると思われる。

帯電による塵埃微粒子の吸着は、電位がキロボルトのオーダーにならないと発生しないので⁽⁷⁾、 30 ボルトというレベルは大きな障害にはならない。

残留電位によるデバイスの静電破壊の問題だが、 100 V 以下では、ほとんどのデバイスが破壊されない⁽⁷⁾。

<3.3> 浮上した状態での搬送 ディスクを浮上したまま搬送するため、電極へ電圧を印加するシーケンスを制御する必要がある。本実験装置において、 0.65 秒の間隔で電圧を切り替えた場合に、ディスクの運動が最もスムーズであった。

ディスクが安定に浮上している時は、電極A2～A22とB2～B22の真下にある。そこから、電極A23に電

Fig. 9 Voltage-applying sequence

Fig. 10 Disk movement in horizontal direction

圧 V_2 (1109 V), B 2 3 に電圧 V_3 (-1178 V) を印加する。それと同時に、電極 A 2 への印加電圧 V_1 (1191 V), B 2 への印加電圧 V_4 (-1089 V) を切る。また、電極 A 1 2 への印加電圧を V_2 から V_1 に、電極 B 1 2 への印加電圧を V_3 から V_4 に切り替える。

0.65 秒後には、電極 A 2 4 に電圧 V_2 (1109 V), B 2 4 に電圧 V_3 (-1178 V) を印加する。それと同時に、電極 A 3 への印加電圧 V_1 (1191 V), B 3 への印加電圧 V_4 (-1089 V) を切る。また、電極 A 1 3 への印加電圧を V_2 から V_1 に、電極 B 1 3 への印加電圧を V_3 から V_4 に切り替える。

このように、図 9 のようなタイミングで各列の電極への電圧の印加シーケンスを制御することにより、ディスクを 3.9 秒の周期で前進後退運動を繰り返させる。

この前進後退運動の様子を図 10 に示す。ディスクが搬送原点から最大 13 mm を移動したことが判る。図 11 は搬送中の 4 つの観測点におけるディスクと電極とのギャップの変動を示す図であり、最大 $18 \mu\text{m}$ (ギャップ 3) の変動があることが判明した。搬送中のディスク表面電位の変化は図 12 に示され、約 10 V の変化が見られた。

図 13 に搬送中のディスクの様子を示す。

4. 結論および今後の課題

本論文において、筆者らが提案した静電浮上リニア駆動機構の構造、動作原理について説明し、試作したプロトタイプ

Fig. 11 Gaps change during transportation

Fig. 12 Surface potential of disk during transportation

Fig. 13 Photograph of Prototype DELP

イプによる 3.5 インチのアルミディスクの非接触搬送を実験で確認した。これで、非磁性材料を非接触状態で搬送する一つの方法を示した。以下に、静電浮上リニア駆動機構の特長と欠点を示した後、実用化に当たって解決すべき問題点を明らかにする。

< 4.1 > 静電浮上駆動機構の特長 磁気浮上式搬送システムと比べ、静電浮上駆動機構は下記の特長を有する。

(1) 磁気力は磁性材料しか直接に浮上することができ

ないが、静電力は金属をはじめ、半導体、誘電体など広範な物体を直接に浮上させることができる。半導体と誘電体の場合には、伝導電子の移動スピードがある程度早ければ、静電浮上の立場から見ると導体とみなしても差し支えない。

(2) 磁気浮上系には、通常アンペアオーダの電流がコイルを流れるが、静電浮上系においては、電流のオーダはミリアンペアである。従って、磁気浮上と比べ、静電浮上による発熱が非常に少なく、真空環境にもっと適している。

(3) 本研究の静電浮上リニア駆動機構は、被搬送体の表面に電極パターンを形成する必要がなく、そのままの状態 で非接触保持して搬送できる。

＜4.2＞ 静電浮上駆動機構の欠点 磁気浮上システムと比べ、静電浮上機構は次のような欠点を持っている。

(1) 浮上剛性が低く、外部振動に弱い。静電浮上の場合に、得られる最大吸引力は電極と浮上体とのギャップに存在する気体の絶縁強度によって決められ、気体の絶縁強度は種類と圧力によって制限されている。例えば、大気中で、空気 の絶縁強度は約 $3 \text{ V}/\mu\text{m}$ で、得られる最大吸引力は約 $40 \text{ N}/\text{m}^2$ である。

(2) 高電圧を使用しているため、安全上に十分な注意を払わなければならない。

(3) 真空度の低い環境 (10^{-4} Torr 以下)⁽⁸⁾ では、放電が起こりやすく、浮上に必要な力が得られなく、静電浮上機構は動作しにくくなる。

＜4.3＞ 実用化にあたる課題 静電浮上駆動機構を実用レベルに仕上げるために、次のような問題を解決しなければならない。

(1) 被搬送体に残留電位が残らないような電圧制御方法を開発する。

(2) 半導体製造プロセスにおけるシリコンウェハの搬送に使われる場合、ウェハの表面が下に向いているため、現存の多くのプロセス装置との適合性が低い。装置内に搬入した後、ウェハの表面を上向きにするような転向装置を設置しなければならない。

(3) 長距離の搬送に当たって、多数の変位センサを配置しなければならず、コストが高くなってしまう。安価なセンサの開発が必要である。

今後はこれらの課題を1つずつ解決していく予定である。

最後に、本研究に協力していただいた(株)三菱マテリアル中央研究所の金本学様に深く感謝いたします。

(平成7年4月25日受付, 同7年9月5日再受付)

文 献

- (1) 玉川, 松井, ほか3名, "超清浄・超高真空空間が拓く未来", ULVAC TECHNICAL JOURNAL, No. 39, pp.79-

83, 1992.

- (2) M. Ota, S. Andoh and H. Inoue, "Mag-Lev semiconductor wafer transporter for ultra high vacuum environment", Proceedings of the 2nd International Symposium on Magnetic Bearings", pp. 109-114, 1990.
- (3) ソーラーリサーチ研究所カタログ, "フロートチャック", 1989年.
- (4) 日経産業新聞, "5キロの基板触れず浮揚", 1995年3月13日.
- (5) G. A. Wardly, "Electrostatic wafer chuck for electron beam microfabrication", Review of Scientific. Instruments, Vol. 44, No. 10, pp.1506-1509, 1973.
- (6) S. J. Woo, J. Jin and T. Higuchi, "Lateral response of electrostatic suspension system", 1995 National Conference Record of IEEJ, 1995.
- (7) 辻, "LSI製造における静電気問題と対策", 静電気学会誌, Vol. 19, No. 1, pp. 28-34, 1995.
- (8) 静電気学会, "静電気ハンドブック", オーム社, 1981.
- (9) J. Jin, T. Higuchi and M. Kanemoto, "Electrostatic levitator for hard disk media", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 5, pp. 467-473, 1995.
- (10) J. Jin, T. Higuchi and M. Kanemoto, "Electrostatic silicon wafer suspension", Proceedings of the 4th International Symposium on Magnetic Bearings", pp.343-348, 1994.
- (11) J. Jin and T. Higuchi, "Direct electrostatic levitation and propulsion", Proceedings of the 34th SICE Annual Conference, pp. 1437-1441, 1995.

Ju Jin

(正員) 1964年12月生まれ。85年中国西安交通大学パワー・エンジンニアリング (Power Engineering) 系卒業。89年長岡科学技術大学機械システム専攻修士課程修了。92年東京大学精密機械工学専攻博士課程修了。工学博士号取得。同年、(財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクト研究員、現在に至る。静電浮上駆動機構、磁気浮上駆動機構の研究開発に従事。IEEE、計測自動制御学会、静電気学会などの会員。

樋口 俊郎

(正員) 1950年2月生まれ。72年東京大学精密機械工学科卒業。77年同博士課程修了、工学博士号取得。同年、東京大学生産技術研究所講師、78年同助教授。91年東京大学精密機械工学科教授。93年(財)神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダー兼任。85年工作機械技術振興賞、88年精密工学会賞、91年日本ロボット学会技術賞。磁気軸受、静電浮上駆動機構、静電モータ、精密加工、圧電素子を利用した精密位置決めなど、メカトロニクスに関する研究に従事。IEEE、精密工学会、計測自動制御学会などの会員。