

静電気力を用いた非接触浮上装置

高知工科大学知能機械システム工学科

田中 智大

目次

1．緒言

- 1．1 要旨
- 1．2 研究背景

2．研究内容の説明

- 2．1 非接触浮上の目的
- 2．2 浮上原理

3．静電気力に対する検討

- 3．1 静電気力とその特徴
- 3．2 搬送技術としての実用性

4．浮上機構

- 4．1 実験装置
- 4．2 運動方程式とモデル化
 - 4．2．1 運動方程式の導出
 - 4．2．2 線形化
 - 4．2．3 状態方程式
- 4．3 VCMを固定した状態での浮上実験

5．実験結果と考察

- 5．1 実験結果
- 5．2 考察

6．結言

謝辞

参考文献

1. 緒言

1.1 要旨

現在あらゆるところで使用されている機械的な支持機構は、一般的に支持する対象物と直接接触して、その動きを制御するものが主流である。このような支持機構の場合、そこには必ず摩擦が発生し塵埃発生の原因となる。このためクリーン度が要求されるとき、支持機構は非接触のものが望まれる。

本研究では、こういった場合が想定される半導体工場でのシリコンウエハの能動的な制御を、静電気力を用いた非接触浮上装置で考える。

1.2 研究背景

現在、極限環境でのシリコンウエハの搬送方法はロボットアームを用いたものが主流となっている。ところが技術進歩による回路パターンの微細化、高集積化が進む中、搬送による塵埃の発生を更に抑制することが望まれている。ロボットアームでの搬送ではウエハに触れるため、接触部へ微粒子が付着しやすく、回路パターンの微細化、高集積化実現の妨げとなっている。

そこで非接触での搬送が可能となれば、発生する塵埃を抑制することが期待できる。非接触での搬送には磁力、空気圧、静電気を吸引力として用いる場合が多いが、それぞれの特徴には、磁力の場合、吸引力は大きく多少重量のあるものでも浮上させられるが磁性体でなければならないこと、空気圧の場合、吸引力は大きく出せるがエアを使うため埃を巻き上げてしまうこと、静電気の場合、吸引力は他の二つと比べかなり小さいが浮上体が絶縁体でない限り材質上の制限はないということがあげられる。これにより、シリコンウエハのような面積が広く重量の小さい物の非接触搬送、ならびに超クリーン度が要求される場合、ロボットアームの改善版としては、静電気力を用いた非接触搬送が最も適していると考えた。

2．研究内容の説明

2．1 非接触浮上の目的

本実験では静電気力を用いた非接触浮上装置を使い、半径 625 (mm)、厚さ 0.5 (mm) の円形ウエハと吸引力を発生させる電極との隙間を初期値 0.5 (mm) とし、これを 0.37 (mm) の位置で安定浮上させるように試みる。また、実際に半導体工場の製造過程への導入を視野に入れ、浮上させた状態で上下に移動させる。

2．2 浮上原理

磁石でN極とS極が引き合うように、電子においてもプラスの電子とマイナスの電子が引き合う力が発生する。この力はクーロン力である。クーロン力を発生させる方法としては、まず電極にプラスとマイナスの電圧をかける。この事で電極表面にプラス、マイナスそれぞれの電子が誘起し、絶縁体でない浮上体の表面にそれと対になる電子が誘起する。これによりその隙間にクーロン力が発生する。これを、吸引力とした。

3. 静電気力に対する検討

3.1 静電気力とその特性

Fig 3.1に示すように、2枚の電極を組み合わせた平行板コンデンサにおいて極板間に電圧 V をかけたとき、2枚の極板の間にはプラスの電荷とマイナスの電荷が引き合うクーロン力により次式で示される静電吸引力 f が働くことがわかっている。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{2d^2} \quad (3.1)$$

ここで、 ϵ は大気中の誘電率、 S は電極の面積、 d は電極間の隙間である。

次にFig 3.2に示すように2つの電極を上へ平行に配置し、その下に導体版を置いた場合、2つの電極間の距離が隙間に比べて十分広いため、電極間に相互干渉がなければ平行板コンデンサが2つ組み合わさったものとみなすことができる。2つの電極の面積をそれぞれ、 S_a 、 S_b 、 $S_a + S_b = S$ とし、両電極間に電圧 V をかけると、上下の板の間には次式の吸引力が働く。

$$f = \frac{\epsilon V^2}{2S^2 d^2} (S_a^3 + S_b^3) \quad (3.2)$$

ここで、

$$S_a = S_b = \frac{S}{2} \quad (3.3)$$

とすれば、Fig 3.2の上下の板間に働く吸引力は、次式となる。

$$f = \frac{\epsilon S V^2}{8d^2} \quad (3.4)$$

以上のことは、シリコンウエハの板を使用した場合でも同様に成り立つことがわかっており、この吸引力を利用して非接触浮上を行う。

しかし、大気中での静電気力の使用には絶縁破壊の問題が存在し、吸引力には限界があることが考えられる。以下ではその静電気力の限界を知り、静電気力での浮上可能な物体の制限に関する見当を行う。

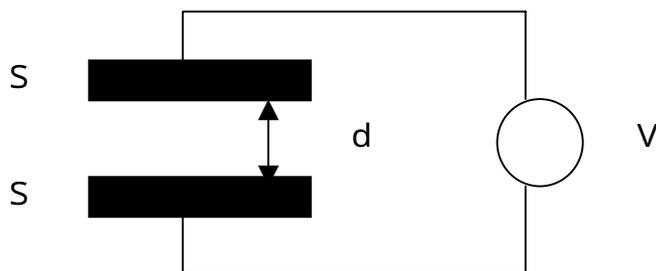
大気中での絶縁破壊は 3.5×10^6 (V/m) であるので、F i g 3 . 2 に任意の電圧 V をかけたとき、絶縁破壊距離 d_{max} は、

$$d_{max} = \frac{V}{2 \times 3.5 \times 10^6} \quad (3.5)$$

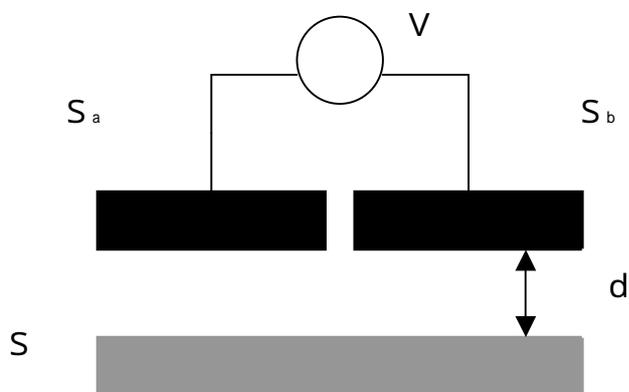
電圧が高くなれば吸引力は大きくなると考えられるため、最大の吸引力 f_{max} は (3.4) 式に (3.5) を代入すると、

$$\begin{aligned} f_{max} &= \frac{\epsilon S V^2}{8 \times (d_{max})^2} \\ &= 5.5264 (KgW) \end{aligned} \quad (3.6)$$

これにより、最大の吸引力は電圧に関わらず一定であり、静電気力により浮上可能で、単位面積あたりの質量が、 0.55 (g/cm²) 以下であればよいことがわかる。



F i g 3 . 1 平行板コンデンサ



F i g 3 . 2 並列に電極を配置したコンデンサ

3.2 静電気力を用いた搬送方法としての実用性

先に述べたとおり静電気力を用いた浮上では、絶縁体以外で表面積が広く、重量が小さければ浮上の可能性がある。これより、今回のような半導体工場でのシリコンウエハの搬送において、静電気力を用いた浮上装置は有効な手段なので、非接触浮上の安定化とその精度向上が実現できれば、十分にロボットアームによる搬送に取って代われる技術と言える。

4. 浮上機構

4.1 実験装置

実験装置はFig 4.1に示す通り浮上させる力である吸引力を発生させる電極、浮上対象であるシリコンウエハ、電極の位置決め装置であるボイスコイルモータ(VCM)、両者をつなぐユニバーサルジョイント、電極と浮上体の位置を検出する上下のセンサ(渦電流式,レーザー式)で構成される。上下のセンサにより、電極の位置と浮上体の位置を上下から把握することでその隙間の距離を得ることができる。

VCMをアクチュエータとして使用したわけは、吸引力に限界があるため、浮上対象に対する電極の位置を把握して絶縁破壊を起こさないようにするためである。

電極の形状はFig 4.2に示す通り中心をマイナスの電極としそれをプラスの電極で囲むように配置する。プラスの電極は3分割されており、この1つとマイナスの電極の1/3とが1つの組として考える。また、電極の総面積と浮上対象の面積はほぼ同じにしてある。

それぞれの面積と質量は：

質量：電極・・・187.73g,ウエハ・・・17.74g

面積：電極 = ウエハ・・・ $2.25 \times 10^{-3} m^2$

電極の厚さ、及び半径は本研究では必要ないので測定していない。

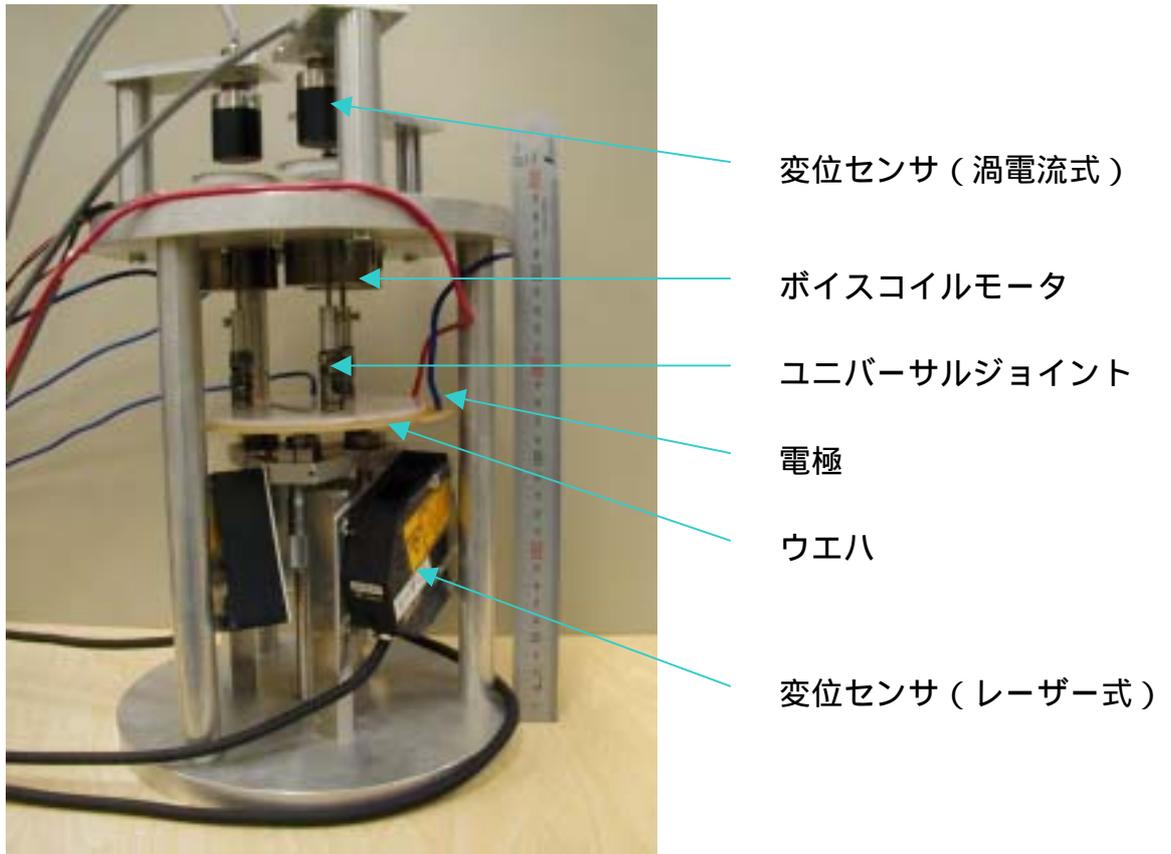


Fig 4 . 1 実験装置

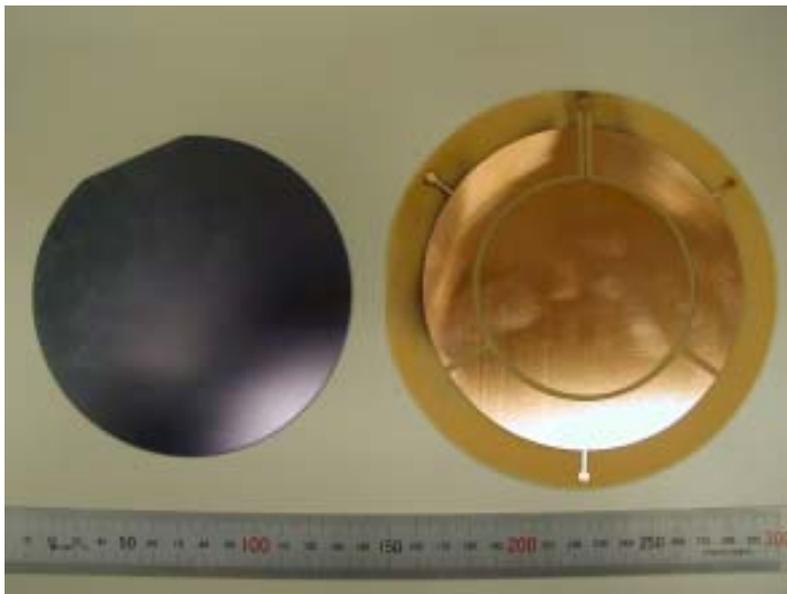


Fig 4 . 2 ウエハと電極

4.2 運動方程式とモデル化

4.2.1 運動方程式の導出

これより前節で紹介した実験装置から、運動方程式を導出しモデル化を行う。また、本研究では装置を均一に3分割し、3つのサブシステムと考えて行い、システムの簡素化を試みた。各々のサブシステムは1自由度浮上システムで、システムの考察の中で次のことを仮定しておく。

1. 装置は中心軸とアクチュエータ軸を含む面に対して対象である
2. 3つのプラスの電極と3つのVCMの特性は同じである
3. マイナスの電極にはプラスの電極の平均を加える
4. VCMのベアリング摩擦はないものとする
5. 電極、浮上対象の隙間などに生じる空気の粘性やダンピング力は無視できるものとする

本研究では分散システムとして考えるため、装置を均一に3分割して制御を行う。このため、渦電流変位センサ、VCM、3分割されたマイナスの電極、1つのプラスの電極、レーザー式変位センサ、浮上対象の面積・質量の $1/3$ をワンセットとして考える。このときシステムは鉛直方向のみを考え、1自由度のシステムとして表す。

記号の説明

m_0 : 浮上体の重さ

m_1 : 電極の重さ

A : 浮上体、電極の面積 (浮上体 = 電極)

s_0 : 浮上体位置 (レーザーセンサ出力 : s_1, s_2, s_3)

z_0 : 電極位置 (渦電流式センサ出力 : z_1, z_2, z_3)

f_{m1}, f_{m2}, f_{m3} : VCMの発生力

f_1, f_2, f_3 : 電極と浮上対象の隙間に発生する静電吸引力

d_1, d_2, d_3 : 電極と浮上対象の隙間の距離

V_1, V_2, V_3 : 電極に加える電圧

i_1, i_2, i_3 : ボイスコイル電流

k_m : 静電吸引力の比例定数

k_i : ボイスコイル電流の比例定数

ε : 大気中の誘電率

VCMの発生力と電流の関係は

$$f_{mn} = k_i \cdot i_n \quad (4.1)$$

ただし、下付添え字の n は分散システムによる各々のサブシステムを表し、
 $n = 1, 2, 3$ である。(以下同様)

電極と浮上対象の関係は

$$d_n = z_n - s_n \quad (4.2)$$

電極と浮上体の隙間に働く吸引力は

$$f_n = \frac{\varepsilon A V_n^2}{8 \times (d_n - x)^2} \quad (4.3)$$

浮上体の運動方程式は

$$m_0 \ddot{s}_0 = f_n - m_0 g \quad (4.4)$$

電極の運動方程式は

$$m_1 \ddot{z}_0 = f_{mn} - m_1 g - f_n \quad (4.5)$$

浮上している時 $\dot{s}_0 = 0, x = 0$ なので、(4.3), (4.5) 式より

$$m_0 g = \frac{\varepsilon A V_n^2}{8 d^2} \quad (4.6)$$

実験装置を分散システムとして扱うことにより運動方程式は、以上の(4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6)で表すことができる。次にこれにより釣り合いの位置での線形化を行う。

4.2.2 線形化

平衡点周りでの微細な動きを考えると、本実験では

$$f_n = f(d, V)$$

より

$$\Delta f_n = \frac{\partial f}{\partial d} \Delta d_n + \frac{\partial f}{\partial V} \Delta V_n$$

よって

$$\Delta f_n = k_m \Delta d_n + k_v \Delta V_n \quad (4.7)$$

ここで

$$\Delta d_n = \Delta z_n - \Delta s_n$$

VCMの発生力については

$$\Delta f_{mn} = k_i \Delta i_n \quad (4.8)$$

となる。これにより、(4.4) 式より

$$m_0 \ddot{s}_0 = f_{n0} + \Delta f_n - m_0 g$$

ここで、釣り合っている時 $f_{n0} = m_0 g$ なので

$$m_0 \dot{s}_0 = \Delta f_n$$

$$\dot{s}_0 = \frac{\Delta f_n}{m_0} = \frac{k_m (\Delta z_n - \Delta s_n)}{m_0} + \frac{k_v \Delta v}{m_0} \quad (4.9)$$

(4.5) 式より

$$\begin{aligned} n \ddot{z}_0 &= \frac{\Delta f_{mm}}{m_1} - \frac{\Delta f_n}{m_1} \\ &= \frac{k_i \Delta i_n}{m_1} - \frac{k_m (\Delta z_n - \Delta s_n) + k_v \Delta V}{m_1} \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2.3 状態方程式

サブシステムの状態ベクトル x は

$$x = (\Delta z_n \quad \Delta s_n \quad \dot{z}_n \quad \dot{s}_n)$$

入力 u は

$$u = (\Delta i_n \quad \Delta V)$$

分散システムの状態方程式は

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_m}{m_1} & -\frac{k_m}{m_m} & 0 & 0 \\ -\frac{k_m}{m_0} & \frac{k_m}{m_0} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{k_i}{m_1} & -\frac{k_v}{m_1} \\ 0 & \frac{k_v}{m_0} \end{bmatrix}$$

ここで、分散システムなので

$$m_1 = \frac{1}{3} m_1 \quad m_0 = \frac{1}{3} m_0 \quad \text{として考える}$$

サブシステムの出力は上下のセンサであるから

$$y = (\Delta z_n \quad \Delta s_n)$$

出力の状態方程式は

$$y = Cx \quad (4.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{となる。}$$

4.3 VCMを固定しての浮上実験

この実験は装置の動きを確認するための予備実験で、あらかじめVCMの動きは固定しておき、ウエハを電極の下部離れたところから近づけ、電極に加える電圧を変化させてウエハを浮上させるものである。

まず電極と浮上対象のスタートギャップを 5×10^{-4} (m)とし、目標ギャップを電極から 3.7×10^{-4} (m)の位置とした。このとき理論値より平衡点に必要な電極に加える電圧は3087 (V)であった。この実験で必要なPD制御のゲインは最適レギュレータ理論を用いて求めた。

平衡点付近での線形化を行うと、(4.7)式より、

$$f = -1160.2 \Delta d_n + 1.39 \times 10^{-4} \Delta V$$

となる。これをもとに最適レギュレータ方を用いてゲインを決定する。尚、この場合の状態方程式は(4.11)より

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_n \\ \dot{s}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_m}{m_0} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta s_n \\ \dot{s}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_v}{m_0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta i_v \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

サブシステムの出力は $y = \Delta s_n$ となる。

5. 実験結果と考察

5.1 実験結果

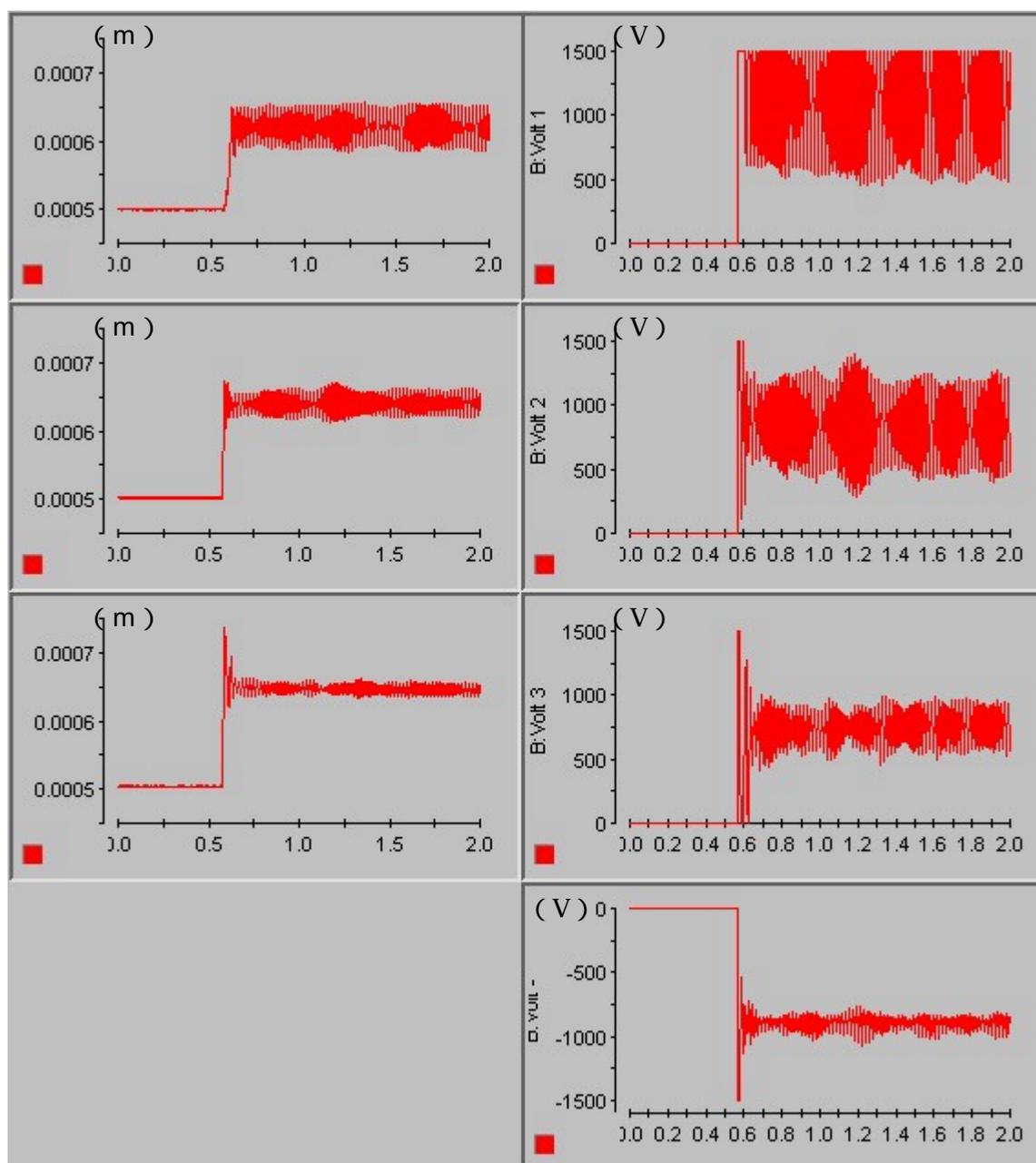


Fig 5.1 浮上開始状況
(左：浮上体の変位 右：電圧の変位)

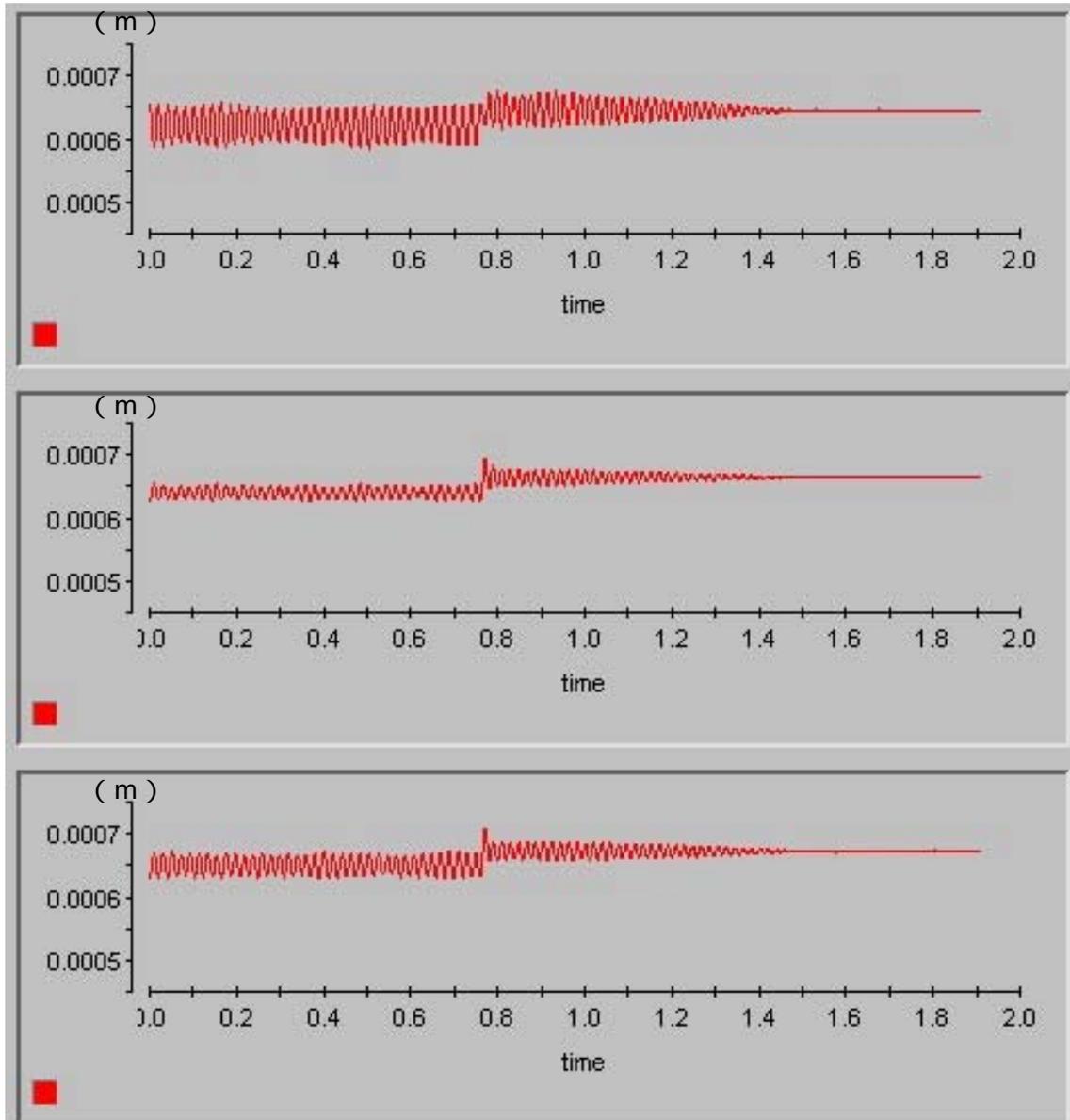


Fig 5.2 浮上体の変位

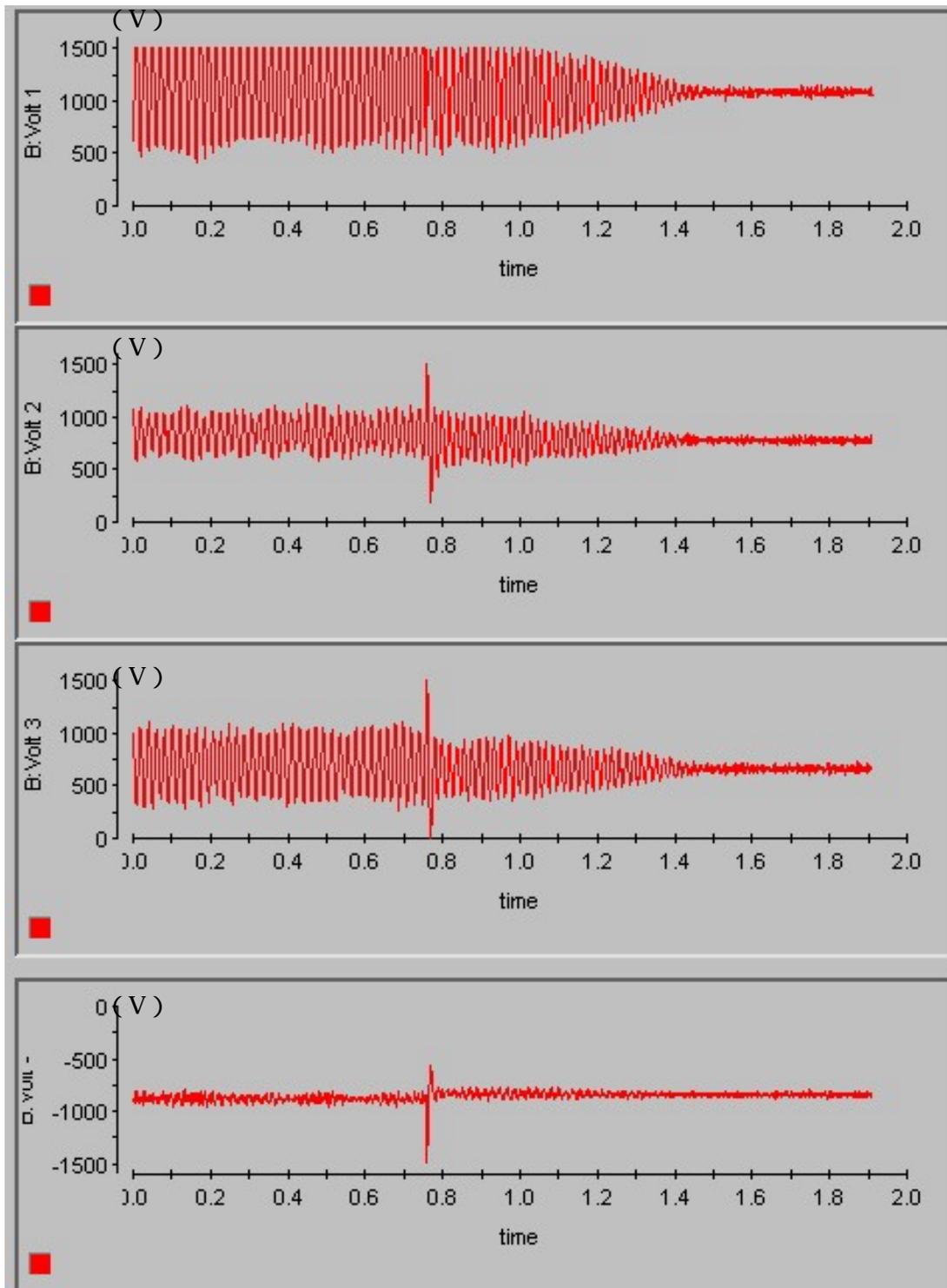


Fig 5.3 電圧の変位

F i g 5 . 1 (左 : x 軸は時間、y 軸はウエハの位置 右 : x 軸は時間、y 軸は電極に発生する電圧) に表されたように初期電圧を加えたときから浮上が開始された。

F i g 5 . 2 , 5 . 3。これは、共に浮上状態から目標ギャップを変化させ、浮上体の位置、電圧を変化させたものである。

F i g 5 . 1 の左図及び F i g 5 . 2 の浮上体の変位では、 $0.0005 \sim 0.0007$ (m) の範囲で変化しており、これは電極から $0.0005 \sim 0.0003$ (m) の距離を表している。つまりこの間に値があれば、浮上体を支えていたマイクロメータ、電極、両方から離れていることを表している。

5 . 2 考察

本研究では、将来的に実用が可能になるように浮上状態でのハンドリングを最終目的としており、そのための V C M を設置していたが、時間の都合上 V C M 固定状態での実験に留まった。しかし実験結果より、V C M 固定状態でも、目標ギャップを変化させることで浮上状態でのハンドリングが確認できた。これにより、V C M を用いて電極を垂直方向に動かすことでの浮上体のハンドリングも実現できると考える。

実験装置の電極に繋いであるアンプは、プラスが 1500 (V) マイナスが 2000 (V) まで出力可能なものを使用していたが、制御する上で、マイナスの電圧を上限 1500 (V) とした。理論値から、今回の電極から浮上体までの目標ギャップ 3.7×10^{-4} (m) での電極に加える電圧 3087 (V) であるが、実際に実験結果からも目標ギャップを大きくすると浮上が確認できなかった。逆に、F i g 5 . 2 , 5 . 3 からわかるように、目標ギャップを小さくすることで、より安定な浮上状態になることがわかった。

6．結言

本研究では、VCMを用いた非接触搬送による静電気浮上装置の開発を目的とし、吸引力として用いた静電気力の特徴や装置のモデル化、制御におけるゲインの測定方法について論じた。また、製作した3自由度の装置について述べ、制御方法を示した。

実験に高電圧を発生させるアンプを使うため、安全面を十分に考慮しなければならず、実験装置製作の段階から実験にいたるまで時間がかかり過ぎ、実験自体をあまり行うことができなかった。尚、今回の実験で一度感電した。これにより、電極を触ってはいけないことがわかった。

本研究では浮上を確認することができ、浮上状態での浮上体の垂直方向へのハンドリングも確認できた。これにより、更に浮上精度を上げ、浮上体の垂直方向へのハンドリングだけでなく、3自由度でのハンドリングが実現できれば、将来的に非接触浮上装置としての実用が可能であることがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、終始懇切丁寧なご指導を賜りました、指導教官の岡宏一先生に深く感謝いたします。

最後に助言や励ましの御言葉をいただいた多くの大学関係者、企業の方々に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1]岡宏一 著 永久磁石の運動制御による磁気浮上機構
- [2]東京大学院工学系研究科 研究代表者 樋口俊郎 静電気をを用いた超クリーン非接触搬送システム
- [3]杉江俊治 藤田政之 共著 フィードバック制御入門
- [4]土谷武士 江上正 共著 現代制御工学
- [5]大槻義彦 著 改訂新版 基礎教養 物理学
- [6]西本敏彦 著 微分積分学講義
- [7]大西清 著 J I S による機械製作図の読み方・書き方 (改訂2版)
- [8]政木慶次 著 非接触搬送を目的とした静電気浮上装置の提案