半導体工業と振動絶縁技術*

富田久雄**

Isolation Technology for Micro-vibration in Semiconductor Factories / Hisao TOMITA

Key words : vibration isolation, micro-vibration, allowable vibration limit, vibration isolation table, semiconductor, clean room, electron beam lithography, scanning tunneling microscopy

1. はじめに

半導体工業は今日の高度情報化社会を支える基幹産業としての役割を担っているが、半導体工業がこのように発展してきたのは集積回路（IC）の微細化、大規模化によるところが大きい。半導体メモリーを例にとると、1 M DRAM の線幅は $1.2\ \mu\text{m}$ まで微細化してきており、今後はサブミクロンのパターン寸法を持つ 4 M DRAM の時代へ進もうとしている。この IC の微細化を支えているのは、半導体製造における微細加工技術や電子顕微鏡などによる検査・評価技術、クリーンルームによる空気洗浄化技術などの進歩である。そしてそれらで用いられる装置・機器ではますます高精度、高性能、高信頼性が要求されるようになってきている。例えば、電子ビーム露光装置などにおけるパターン寸法精度はパターン最小線幅の $1/5 \sim 1/20$ が要求されるので、サブミクロン以下の精度が必要となる。パターン寸法精度を左右する要因には多くのものがあるが、微振動問題も製品歩どまりに影響する重要な因子の一つである。そして今後の IC の超微細化に伴ってより完全な微振動防止技術が要求されるようになると考えられる。

微振動の発生原因としては、装置の駆動機構そのものが起振力となって作用する場合と、外部的な要因により床などから振動が伝わってくる場合の二つがある。

後者の場合、微振動ではないが地震による振動も同じ経路で伝わる。

ここでは半導体工業におけるこのような微振動問題とその絶縁技術の現状について概説し、問題点や将来展望についても触れることにする。

2. 振動絶縁技術の現状

2.1 防止技術の分類と振動許容値

微振動の外的要因としては、建物の外では道路交通、鉄道、建設工事等による地盤振動、屋内では他の設備機器の振動、人の動きや物の運搬に伴う振動などがあり、これらは振動数で大体数 Hz $\sim$ 100 Hz 程度である¹⁾。

このような微振動の対策としては、振動源そのものの対策を行ったり、伝播経路のどこかを絶縁し、振動が伝わってこないようにしたりする。絶縁する場所としてはおもに建物、床、機器の三つである。図 1 に工場建設時に振動源や地盤振動特性、建物への振動入力損失なども考慮した、総合的な防振対策技術検討フローの例を示す。

防振対策を検討する場合、対象機器の振動許容値を知る必要があるが、これは機器に要求される精度、性能によって異なる。各種機器の振動許容値の大まかな指針の例を図 2 に示す。半導体工場の場合、概略振動変位で $1 \sim 0.1\ \mu\text{m}$ 以下、振動加速度で $1 \sim 0.1\ \text{gal}$ 以下が目安となる。

2.2 建物、床における振動絶縁

これらは建物、床を浮き構造にし、防振ゴムなどを介して振動を絶縁するものである。最近では地震に対する配慮から免震構造をあわせ持つようにする研究も行われている。すなわち、地震の振動数は数 Hz 程度なので積層ゴムやコイルスプリングなどを使い 1 Hz

* 原稿受付 平成元年 9 月 27 日

** (株)東芝 (川崎市小向東芝町 1)

図1 防振対策技術検討フロー (文献1) の Fig. 1 による)

図2 各種精密機械の振動許容値例²⁾

以下に系の固有振動数を下げるものである³⁾。微振動を対象にしたものではないが、地震に対する対策として開発された免震床の例を図3に示す。この免震床は平常時には引張りばねの予引張り力で基礎に固定され

図3 免震床の外観 (東芝総合研究所)

図4 電子ビーム露光装置の構成図

ており、地震時にその予引張り力よりも大きな力を受けることで作動を開始する。固有振動数は約0.3 Hzである。

2.3 機器における振動絶縁

除振台を使った電子ビーム露光装置の例を図4に示す。除振台は従来から微振動除去のため、半導体製造装置にはよく使われている⁴⁾。図5に当社のクリーンルーム内で測定した除振台と床の振動測定例を示す。除振台設置により、微振動レベルを大体0.1 μm, 0.1 gal 以下にできている。このような除振台では空気ばねなどを使ってばね定数を小さくし、固有振動数をできるだけ小さくするようにしている。しかし現実

図5 除振台の効果 (床上と除振台上の上下方向振動加速度)

図6 除振台と機器の振動モデル

的な除振台の大きさから、固有振動数を1 Hz以下にすることは難しく、微振動に対する除振には十分でも地震に対しては問題が残されている。

地震対策が必要な場合は、2.2項で述べたように建物や床は免震構造にし、さらに機器レベルでは除振をすることなども考えられる。

2.4 除振台のモデル化

微振動があると機器における精密位置決め等に影響する。ここでは機器を除振台に搭載した状況を図6のような単純化したモデルで表し、微振動による位置ぶれを除振台との相対変位として考えることにする。

ここで、

x_b : 床の振動変位

x_i : 除振台の振動変位

x_t : 機器の振動変位

$x_z = x_t - x_i$: 機器と除振台の相対変位

k_i : 除振台のばね定数

k_t : 機器のばね定数

f_t : 機器の起振力

m_i : 除振台の質量

m_t : 機器の質量

ω_i : 除振台の固有円振動数 ($=\sqrt{k_i/m_i}$)

ω_t : 機器の固有円振動数 ($=\sqrt{k_t/m_t}$)

この2自由度系の振動方程式は減衰を無視すると

$$m_t \ddot{x}_t + k_t(x_t - x_i) = f_t \quad (1)$$

$$m_i \ddot{x}_i + k_i(x_i - x_b) + k_t(x_i - x_t) = 0 \quad (2)$$

系全体が円振動数 ω で定常単振動を行っているとして、これらを解くと $x_z = x_t - x_i$ より

$$x_z = \frac{f_t(\omega_i^2 - \omega^2)/m_t + x_b \omega_i^2 \omega^2}{\omega^4 - [\omega_i^2(1 + m_t/m_i) + \omega_t^2] + \omega_i^2 \omega_t^2} \quad (3)$$

となる。床から伝わってくる振動のみを考え、 $f_t = 0$ とし、 $m_t \ll m_i$ とすると、床 x_b と相対変位 x_z との振幅比 X_z/X_b (振動伝達率) は

$$\frac{X_z}{X_b} \approx \frac{\omega_i^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_t^2)(\omega^2 - \omega_i^2)} \quad (4)$$

と表される。 $\omega_i \ll \omega \ll \omega_t$ のとき、振動伝達率は

$$\frac{X_z}{X_b} \approx -\left(\frac{\omega_i}{\omega_t}\right)^2 \quad (5)$$

これより相対振動変位 x_z を小さくするには、除振台の質量を機器より十分重いという条件で、 ω_i/ω_t を小さくすること、すなわち除振台の固有円振動数 ω_i を小さくし、機器の固有円振動数 ω_t を大きくとればよいことがわかる。このような理由から、機器はなるべく小型軽量、高剛性になるように設計される。

一例として走査型トンネル顕微鏡 (STM)⁵⁾⁶⁾ の除振性能設計図表の例を図7に示す。図7でIIIは式(4)の振動伝達率を対数表示した伝達関数であり、I, IIはそれぞれ床-除振台および除振台-機器間の伝達関数である。また図8は実際のSTMの除振装置の例で、支柱からコイルばねで除振台を吊り下げており、除振性能を高めるため、ばねを2段に使った構造となっている。

2.5 駆動系の起振力による振動

次に駆動系の起振力による振動について考える。

床からの振動が小さいとして $x_b = 0$ とし、前と同じく $m_t \ll m_i$ とすると、式(3)から

$$x_z \approx -\frac{f_t}{m_t(\omega^2 - \omega_t^2)} \quad (6)$$

この結果は1自由度の振動系の場合と同じ形とな

図7 除振装置とトンネルユニットの組合せにおける除振性能⁹⁾

図8 STM除振装置の外観(東芝総合研究所)

り、 ω_0 を十分高くして、 $\omega \ll \omega_0$ とすると

$$x_z \approx \frac{f_1}{k_1} \quad (7)$$

となるので、ばね定数 k_1 を大きくするほど、すなわち剛性を上げるほど相対振幅は小さくなる。これは定常振動の場合であるが、移動機構の高速動作にあたって、その過渡振動を抑制するためにも機構を軽量化し固有振動数を上げる必要のあることが分かっている⁷⁾。

例えば図9で磁性材料で作られた移動体Qを磁石PによってA点からB点に移動させる場合を考える。

図10のような速度パターンでPを動かしたときのQの過渡振動は図11のようになり、固有周期 T_0 が短いほどQの振動は抑制されることが分かる。

このように、機器の駆動力に起因する振動への対策としては、軽量化、高剛性化など機械自体の設計によ

図9 移動機構のモデル化⁷⁾

図10 移動の速度のパターン⁷⁾

図11 移動時間による過渡振動の違い⁷⁾

る対処が中心となっている。

3. 問題点と今後の動向

これまでの半導体工業における振動絶縁技術では除振台が主に使われているが、地震の振動数からみると除振台によってかえって振動が大きくなることも考えられる。対象機器によっては、今後免震技術なども取り入れた除振装置や免震床との組合せなどが検討されるであろう。また除振台は上下方向の振動ばかりでなく、実際にはローリング、ピッチングも存在する。機器も剛体ではないので部材の弾性振動などの問題まで考慮した防振対策が望まれる。

現状では除振台の固有振動数はなるべく低く、機器の固有振動数はなるべく高くするというように別々に考えているが、場合によっては連成振動を考えること

も必要であろう。さらに、精密除振ということでは除振台をアクティブコントロールすることなども考えられる。このアクティブコントロールについては本誌に別記事として掲載されているのでそちらを参照されたい。

4. あ と が き

半導体工業における振動防止技術の現状について簡単にまとめた。ここでは振動に起因する微振動を問題にしたが、騒音による音圧加振の問題なども考慮しておく必要があると思われる。実際、透過型電子顕微鏡(TEM)などでは音圧による像のぶれが問題となり、室外騒音に対する遮音対策や室内の空調機器の騒音対策の実施が必要ながある。ICの高集積化は今後ともさらに進み、それと共に微振動の低減の重要性もま

すますます大きくなっていくと思われる。

参 考 文 献

- 1) 麦倉喬次ほか：精密工場の微振動対策検討例，鹿島建設技術研究所年報，31（1983）175.
- 2) 鹿島建設技術パンフレット 92-50.
- 3) 近藤博文ほか：免震床に関する研究，第7回日本地震工学シンポジウム講演集（1986）1615.
- 4) 松本有史，東条 徹：電子ビーム描画装置，日本機械学会誌，87，791（1984）1180.
- 5) 岡野 真ほか：走査型トンネル顕微鏡のための除振技術，電子技術総合研究所彙報，51，10（1987）725.
- 6) 赤間善昭ほか：走査型トンネル顕微鏡の試作，昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1987）253.
- 7) 富田久雄：振動系の位置決め技術，日本機械学会誌，89，811（1986）628.

(p. 2135 より続く)

その結果，次のような有用な結論が得られた。

- (1) 本研究で採用した，適当な信号処理を施した切削抵抗の動的成分 $dF_{v0.5}$ は切りくずの破断状況を正確に反映し，その波形は周期性を持っている。従って，この波形の振幅と周期について詳細に検討すれば，切りくず形態のより細かい分類及び自動認識が可能になると考えられる。

切りくずはSNGG形チップの場合のみ生成するが，Long Tubular (LTC) 形の切りくずが生成される場合には動的成分は切りくず処理性が良くない他の連続形切りくずとはほぼ同じ値である。

以上のように，切りくず形態は，切削条件及び工具の形状，更には同じ切削条件でも時々刻々に変化するが，切りくず処理性の観点から考えると，ある周波数領域の切削抵抗の動的成分により，少なくとも破断形で処理性の良い切りくず形態を他の切りくず生成，排出状態と明確に区別して認識できることがわかる。すなわち，動的成分の最大振幅を監視することにより処理性が良い破断形切りくずのインプロセス認識が可能であると言える。そこで，この点を確認するために，クレータ摩耗の進行

に伴う切りくず排出状態と動的成分の変化に対しても検討を行った。この実験では，K 10 種のチップを使用した。なお，工具にはクレータ及びフランク摩耗が同時に存在しているが，ここでは切りくず排出状態の変化と最も密接な関係があるクレータ摩耗のみを考慮している。また，同じ値の摩耗量に対して連続形と破断形切りくずを得られるように切削条件を変化させて切削実験を行った。

実験の結果，切削の進行に伴ってクレータ摩耗はほぼ一様に増大し，切削抵抗の動的成分 $dF_{v0.5}$ も増大している。しかし，同じクレータ摩耗状態で切削条件を変えて，生成される切りくず形態を連続形から破断形に変化させると，動的成分 $dF_{v0.5}$ は約3倍程度大きくなり，明白な違いのあることが示されている。すなわち，実際の切削状態の下でも，適当なしきい値を設けて切削抵抗の動的成分 $dF_{v0.5}$ を監視すれば，生成される切りくず形態が処理性の良い破断形であるか否かを十分な信頼性のもとにインプロセス認識が可能であると言える。

(服部 敏夫)