

解説

半導体プロセスにおけるレーザービーム走査技術

保坂純男

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1986年7月24日受理)

Laser Beam Scan in Semiconductor Fabrication Process

Sumio HOSAKA

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

1. はじめに

現在、半導体産業はわが国を支える重要な基幹産業であり、これを支える基盤技術は技術革新の原動力となっている。なかでも、半導体プロセスにおけるレーザー光の利用は、有機レジスト等との光化学反応、レーザー加工、レーザー CVD (chemical vapor deposition)、レーザーエッチング等の応用分野への展開が期待されている。

レーザービームを走査し、半導体プロセスに応用しようとする試みは 1960 年代頃から活発に研究されてきた。その大きな流れとしては Bell 研に見られるように、レジスト材との光化学反応を利用したマスク、拡大原画マスク (レティクル) パターンの形成およびレーザー加工を利用した直接パターン形成の二つの場合がある。前者はデバイス寸法より数十倍前後のレティクルをレジスト潜像により製作する PPG (primary pattern generator) の開発¹⁾であった。この場合、その後研究開発された電子線 (EB) 描画技術と競合関係にあり、電子線の微細性および制御性の優位さ²⁾よりこの分野の主役は EB 描画技術へと移行している。具体的には PPG の研究開発グループは EBES (electron beam exposure system)³⁾の研究開発へと移行している。後者はトリミングおよびスクライブラインの直接加工の研究⁴⁾に端を発し、磁気バブル素子のパーマロイ電極の直接加工への応用⁴⁾やレジストを用いず、直接レティクル製作可能な LRG (laser reticle generator)⁵⁾の研究開発へと発展している。しかし、これらの装置のレーザービーム走査は

機械式走査が採用されているため、走査速度および精度の点で十分でなく、実用化までに至っていない。現在、実用化されている装置は寸法測定機⁶⁾、冗長ビット修正装置⁷⁾、レーザーアニーリング装置⁸⁾等である。

しかし、最近になり、EB 描画法と比較してレーザー描画法が、(i)大気中で動作できること、(ii)経済性が良いこと、(iii)レーザー加工等の QTAT (quick turn around time, 工程の迅速化) 効果を有すること、あるいは、(iv) 1 μm 前後までレーザービームが絞れること等の理由から QTAT 分野の一手段として再認識され、研究開発の動きが出始めている。

ここでは、半導体分野から見たレーザービーム走査技術への期待と最近のレーザー走査技術の応用を述べるとともに、音響光学 (AO, acousto-optical) 素子を用いた新しいレーザービーム走査技術について解説する。

2. レーザービーム走査技術への期待

最近の半導体市場は製品構成に変化が出始めている。図 1 は米国での半導体市場のトレンドを示す⁹⁾。半導体市場の多くを占めていたメモリ素子は DRAM (dynamic random access memory) のトレンドに示されるように '84 年を境としてその伸びが鈍化傾向にある。しかし、スタンダードセルやゲートアレーを中心とした特定用途向け LSI, ASIC (application specific integrated circuit) はメモリ市場の減少にもかかわらず大きな伸びを示している。また、米国 Dataquest 社の予測では ASIC の市場は今後 5 年間で約 3 倍に増加すると述べている。なかでも、スタンダードセルは約 20 倍、ゲート

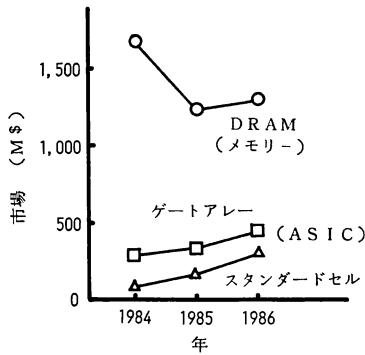


図1 米国の半導体市場と市場予測⁹⁾

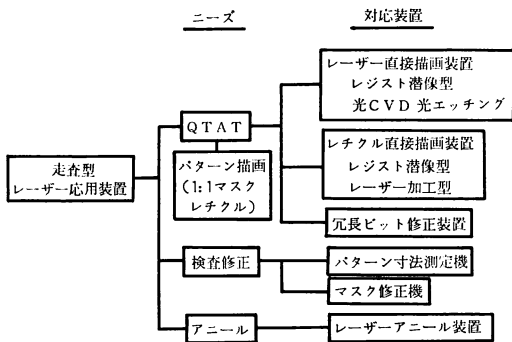


図2 走査型レーザー応用装置の半導体プロセスにおけるニーズとその対応装置

アレーは約3倍に成長すると予測されている¹⁰⁾。

一方、微細化技術はさらに微細な加工技術の研究開発に傾注している。メモリ分野においては'90年には4 MDRAMが実用化され、そのデザインルールは0.6 μmと予想されている¹¹⁾。しかし、上述のASICの場合、現在のデザインルールは2, 3, 4 μmが主体であり¹⁰⁾、今後、最先端の微細加工技術が必要となるとは考えら

れない。これは、ASICが少量多品種製品であるのでQTAT技術を重要視しているためであると考えられる。したがって、今後の半導体プロセスにおける重要技術は従来のように微細加工技術を駆使した高集積化技術のみならずASICのような少量多品種製品に対応できるQTAT技術の研究開発である。

以上のような半導体市場の変化および技術の分極化とあいまって1章で述べたレーザー光の利点より、レーザー応用技術は少量多品種製品対応のQTAT技術として期待されている。図2は走査型レーザー応用装置の半導体プロセスにおけるニーズとその対応装置を示す。なかでも、レーザー描画装置、冗長ビット修正装置は、今後のQTAT手段の一つとして位置付けられている。しかし、実用化されるためには多くの課題を有している。レーザービーム走査技術においても、従来技術では上記のQTAT手段として実用化が難しく、レーザービームを1 μm前後に絞り込むと共に高速高精度なレーザービーム走査技術が要求される。一方、微細加工技術に本走査技術を適用するのは難しいが、加工寸法の検査等においては応用できる分野である。すなわち、寸法測定技術は微細加工技術とともに、さらに高精度化が必要となるう。

3. 各種レーザービーム走査法と応用例

レーザービーム走査方式は大別して次の3方式に分類される。(i)機械的直線運動による方法、(ii)鏡面回転による方法、(iii)AO素子のような回折現象による方法がある。以下、これらについて、最近の応用例を示しながら、レーザービーム走査方法の長所、短所を述べる。

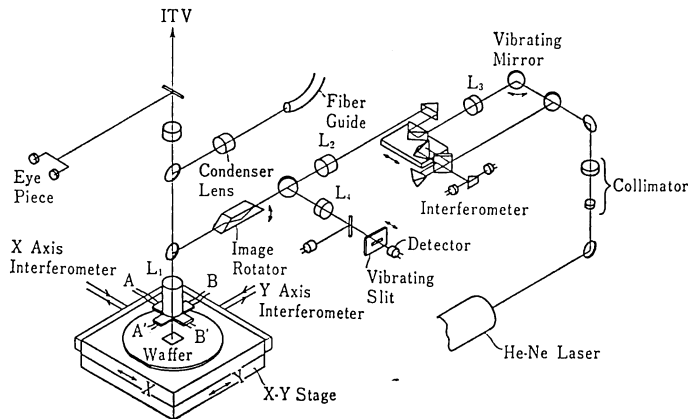


図3 レーザー干渉式座標測定機の光学系⁶⁾

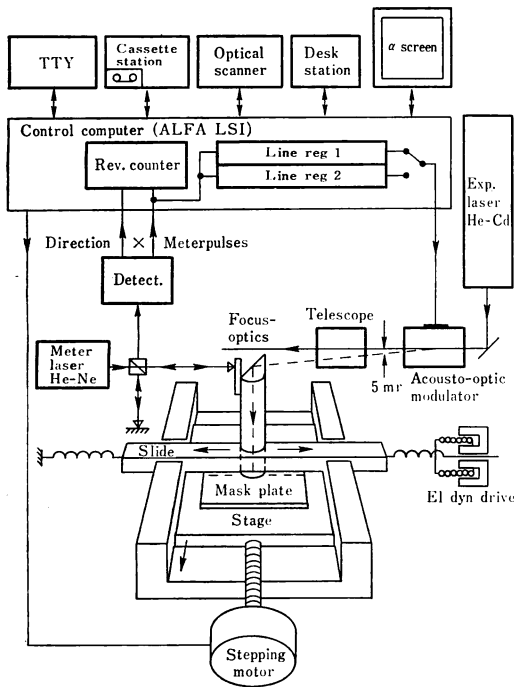


図4 Laserscan システムの原理図¹²⁾

3.1 機械的直線運動による方法

図3はレーザー干渉式座標測定機の光学系を示す⁶⁾。試料上のパターン端部を検出するためのレーザービーム走査はレンズ L_3 の後側に設置されたプリズムを直線運動することにより実行される。また、高精度にビーム位

置決めを行なうためにレーザー干渉計により常にプリズムの位置を $0.01 \mu\text{m}$ 単位で測定している。これは、機械駆動の安定化が難しいために干渉計を設け、速度誤差等の影響をなくした応用例である。

図4は、上記のレーザービーム走査方式をレーザー描画装置に応用した例である¹²⁾。この方式はミラーおよび対物レンズと一緒に、機械的直線運動により走査した例であり、図3の場合と若干異なる。すなわち、対物レンズが走査されるため、走査方向と直角な方向の運動精度がビーム位置決めに大きく影響する。図4では空気軸受け案内を使用して走査速度の安定化を図っているが、直角方向の変動を抑えるのは難しい。すなわち、精度の点から見ると、対物レンズを固定し、入射するビームを走査したほうが高精度化は図れる。しかし、図3および図4の両者とも直線運動に伴う yawing 等を低減した超精密機構が必要である。また、高精度ビーム位置決めはレーザー干渉計に依存している。このために、走査速度はレーザー干渉計の fast pulse の許容最高周波数に依存するのでいずれの場合も高速化を図ることは困難である。

3.2 鏡面回転による方法

この方法はポリゴンミラーおよびガルバノミラーを使用する場合である。図5はポリゴンミラーによるレーザービーム走査法を用いたラスタ走査型レーザー描画装置の例である¹³⁾。この場合、ポリゴンミラーの製作誤差や回転時の軸ブレ、回転速度ムラ等によるビーム位置決め

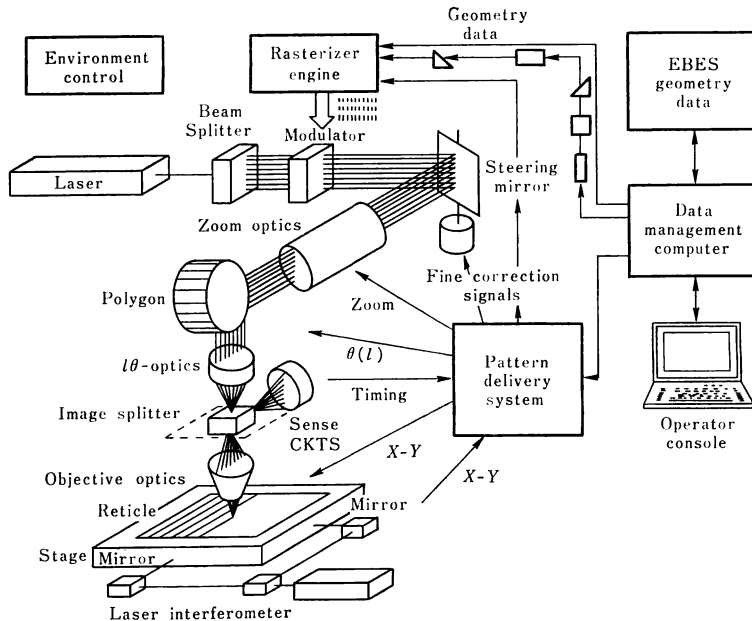


図5 CORE-2000 レティクル描画装置の概略図¹³⁾

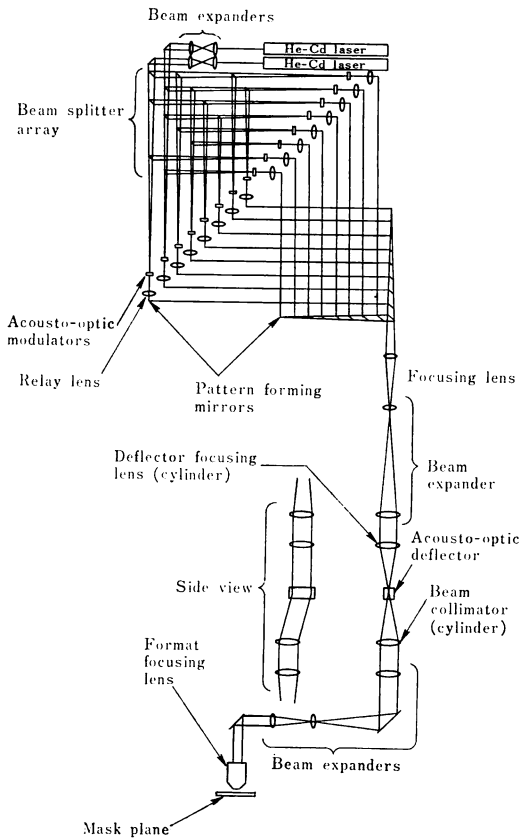


図 6 マルチビームを用いたレーザーパターンジェネレータ LPG の光学系¹⁴⁾

誤差が発生しやすい。さらに、移動台の連続移動速度の速度変動の補正など非常に難しい問題がある。また、高速化のために8本のマルチビームを使用しているため、ビームのアライメント技術が必要となり、高精度なビーム位置決めが難しい。

3.3 AO 素子による方法

AO 結晶に超音波を入力することにより、音波の周波

数と結晶内の音速とに依存した密度の粗密が音波の伝播方向に形成される。これは結晶に回折格子ができた状態と等価となり、入射レーザービームは回折され、光偏向素子として利用できる。図 6 は AO 偏向素子を使用したラスタ走査型レーザー描画装置の光学系を示す¹⁴⁾。この場合、AO 素子は電気信号で偏向角を制御できるので 3.2 節の場合より各種誤差の補正が容易となり高精度化が期待できる。しかし、AO 偏向素子が数度の角度しか偏向することができないので、図のシステムではスループットを向上するために、16 本のマルチビームを採用している。これは、高速偏向時の AO 偏向素子に円筒レンズ効果が発生するために高速レーザー偏向ができないことに起因している。また、マルチビームの採用は 3.2 節同様にビームアライメント等難しい問題を抱えている。

以上、まとめると、次のようなことがいえる。

- (1) 高精度なレーザービーム走査を得るためには、直線運動によるレーザー走査法と超精密計測法とを組み合わせた方法が最適と考える。この場合、超精密な送り機構が必要である。
- (2) 高速高精度なレーザービーム走査を得るためには、AO 素子が優れているが、高速レーザービーム走査が課題である。

4. 高速レーザービーム走査のためのアプローチ

ここでは、制御性の良い AO 偏向素子を用いた場合の高速レーザービーム走査について紹介する。

4.1 円筒レンズ効果

図 7 は AO 偏向素子の低速および高速に偏向した際の回折後の出射ビームのレンズ作用について示す。(a) の低速の場合には AO 結晶内に発生する密度の粗密ピッチが一定であるので、回折角 θ_1, θ_2 はほとんど等し

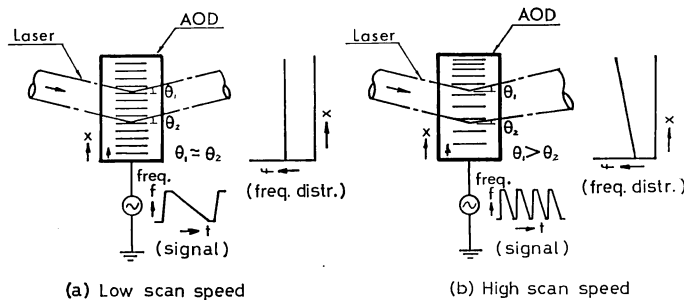


図 7 走査速度による AO 偏向素子での円筒レンズ効果 (a) 低速の場合, (b) 高速の場合

く円筒レンズ効果の焦点距離 F_c は無限大となり、平行光で出射される。一方、(b)の高速の場合、図のような入力信号に対して密度の粗密ピッチが結晶内で図のように変化する。このため、偏向角 θ_1, θ_2 は粗密ピッチの狭い所で大きな回折角でレーザー光が偏向され、あたかも音波伝播方向にレンズ作用をもった円筒レンズを設置したかのように光学的な変化が起こる。これが円筒レンズ効果である。

円筒レンズ効果の焦点距離 F_c は Dickson¹⁵⁾ が導いた式に電圧・周波数変換回路 VCO (voltage control oscillator) の特性を考慮すると次式のように表わされる。

$$F_c = \frac{v_a^2}{\lambda} \left\{ \left(\frac{dV_i}{dt} \right) \left(\frac{df}{dV_i} \right) \right\}^{-1} \quad (1)$$

ただし、 v_a は結晶内の音波の伝播速度、 λ はレーザー波長、 V_i は鋸歯状波発生回路から VCO への入力電圧、 f は VCO から AO 偏向素子への入力周波数、 t は時間である。

さて、AO 偏向素子の偏向軸が対物レンズの入射瞳に投影されるような光学系の場合、対物レンズのレンズ作用は対物レンズの前側、すなわち距離 F_c の位置からレーザー光が出射され、後側の距離 b の位置に結像する。 F_c と b との間にはレンズ公式より次式の関係がある。

$$b = f_i + \frac{f_i^2}{F_c - f_i} \quad (2)$$

ただし、 f_i は対物レンズの焦点距離である。式(2)の b は円筒レンズ効果がまったくない場合 ($F_c = \infty$), f_i となるが、円筒レンズ効果がある場合、式(1)を考慮した距離に変化する。式(2)の変化について検討すると、次の2通りの場合が考えられる¹⁶⁾。

- (i) f_i を基準とした焦点位置の平均的な変化 (Δb_{static})
- (ii) 偏向位置に関係した焦点位置の相対的な変化 ($\Delta b_{\text{dynamic}}$)

ここでは(i)を静的な円筒レンズ効果、(ii)を動的な円筒レンズ効果と呼ぶ。前者は AO 偏向素子を駆動する速度に関係し、後者は駆動する電気回路の変換特性の直線性に関係する。

(i)の場合、 $F_c \gg f_i$ とできるので式(1)より次のように表わされる。

$$\Delta b_{\text{static}} = \frac{\lambda f_i^2}{v_a^2} \left(\frac{dV_i}{dt} \right) \left(\frac{df}{dV_i} \right) \quad (3)$$

上式の (df/dV_i) を一定とすると、 Δb_{static} は走査あるいは偏向速度 (dV_i/dt) の大きさに比例して大きくなる。

次に、(ii)の場合について考える。電気系の (dV_i/dt) , (df/dV_i) の変動を次のようにすると $\Delta b_{\text{dynamic}}$ は式(4)で表わされる。

$$\Delta b_{\text{dynamic}} = \frac{\lambda f_i^2}{v_a^2} \left\{ \left(\frac{df_0}{dV_i} \right) \Delta \left(\frac{dV_i}{dt} \right) + \left(\frac{dV_0}{dt} \right) \Delta \left(\frac{df}{dV_i} \right) \right\} \quad (4)$$

$$\left(\frac{dV_i}{dt} = \frac{dV_0}{dt} + \Delta \left(\frac{dV_i}{dt} \right), \quad \frac{df}{dV_i} = \frac{df_0}{dV_i} + \Delta \left(\frac{df}{dV_i} \right) \right)$$

通常、 $\Delta(dV_i/dt) \ll \Delta(df/dV_i)$ であり、 $\Delta(df/dV_i) = \gamma \cdot (df_0/dV_i)$ とすると、式(4)は式(5)のように近似できる。ただし、 γ は直線性からの歪み率である。

$$\Delta b_{\text{dynamic}} \approx \frac{\lambda f_i^2}{v_a^2} \left(\frac{dV_0}{dt} \right) \gamma \left(\frac{df}{dV_i} \right) \quad (5)$$

上式は (dV_0/dt) が小さい場合、 $\gamma(df/dt)$ が大きくても、 $\Delta b_{\text{dynamic}}$ はほとんど無視することができる。しかし、 (dV_0/dt) が大きくなると、 $\Delta b_{\text{dynamic}}$ が大きくなるが、対物レンズの焦点深度内ならばビームボケ等の現象は現われない。さらに、 (dV_0/dt) が大きくなると、焦点深度の範囲を越え、ビームボケの状態となる。すなわち、高速レーザービーム走査を行なうと、走査方向のビーム径の変化が走査範囲内で発生する。たとえば、2 kHz(周期 $\tau = 500 \mu\text{s}$) の繰返し周波数までビームボケが起こらない AO 偏向システムであるとすると、20 kHz ($\tau = 50 \mu\text{s}$) まで周波数帯域を改善しようとするには (df/dV_i) の歪み率 γ を 1/10 に改善しなければならない。

なお、焦点変動 D_f とビーム径 D_b との関係は焦点深度(対物レンズでビームが絞られた場合に波面の曲率半径が最小となる距離)の式より次のように表わされる。

$$D_b = \text{NA} \cdot D_f \quad (6)$$

$$\left(D_b \geq \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{\text{NA}} \right)$$

ただし、NA は対物レンズの開口数である。

4.2 円筒レンズ効果補正方法¹⁶⁾

円筒レンズ効果は Δb_{static} および $\Delta b_{\text{dynamic}}$ の二つの成分で現われる。高速レーザービーム走査を行なうには次の二つの補正が必要である。

(1) Δb_{static} を補正するためには円筒レンズ効果と逆極性の焦点距離をもった円筒レンズを AO 偏向素子の出射側に設置する。

(2) $\Delta b_{\text{dynamic}}$ を補正するためには AO 偏向素子の駆動用電気系を改善する必要があり、とくに、VCO の電圧周波数変換特性を改善しなければならない。

ここでは(2)の補正方法について以下に説明する。

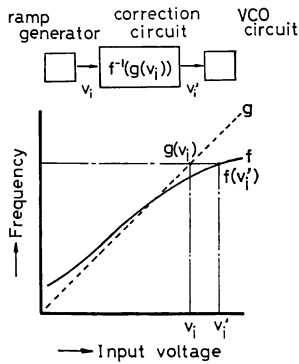


図 8 VCO 電圧・周波数変換特性の改善のための Feed-Forward 制御法の説明図¹⁶⁾
 f: VCO の特性, g: 理想的な特性

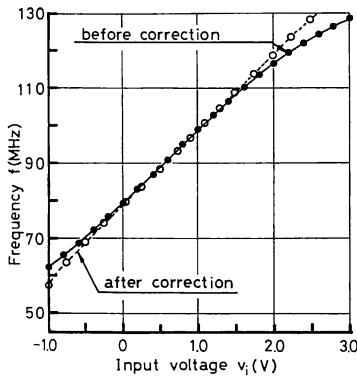


図 9 Feed-Forward 制御法による VCO の電圧・周波数変換特性の改善例¹⁶⁾
 実線: VCO の特性, 破線: 改善後の特性

図 8 に Feed-Forward 制御法を用いた補正方法の概念図を示す。実線 f は VCO の電圧・周波数変換 (V - f) 特性を示し、目標とする特性 g を破線で示す。図に示すように、VCO の出力周波数 f を特性 g に近づけるためには鋸歯状波発生回路と VCO との間に設定した補正回路の入出力電圧 V_i, V_i' の関係を次式のようにすればよい。

$$V_i' = f^{-1}(g(V_i)) \quad (7)$$

補正回路は式(7)を多項式で展開近似したアナログ演算回路網で構成するのが望ましい。この方法で市販された VCO の V - f 特性を改善すると、図 9 の特性を得ることができる。たとえば、70~120 MHz の帯域に注目すると、直線性からの歪み約 40% が 0.5% に改善できることがわかる。

4.3 高速レーザービーム走査

図 10 は実験に用いた描画装置の概略図を示す¹⁷⁾。装置は、AO 偏向素子を用いたレーザー変調偏向光学系、

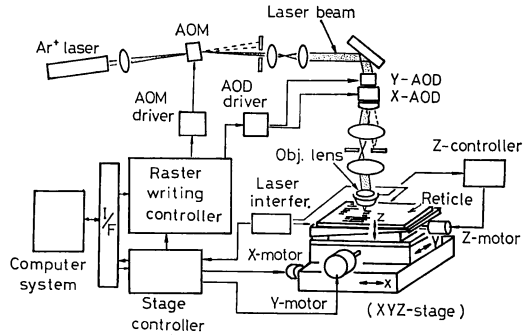


図 10 AO 偏向素子による高速レーザービーム走査を用いたラスタ走査型レーザー描画装置 (レーザーパターンジェネレータ) の概略図¹⁷⁾

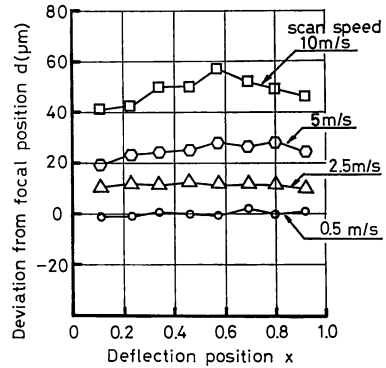


図 11 円筒レンズ効果補正なしの場合のレーザー偏向位置に対する焦点位置の変化¹⁹⁾

XYZ 移動台および制御系から構成されている。ここではレーザービーム走査について述べる。レーザー源より出射されたレーザー光は AO 変調素子を通り、AO 偏向素子に入射する。AO 偏向素子で偏向されたレーザー光は 2 個のレンズより成るリレーレンズによりあたかも対物レンズの入射瞳でレーザー偏向するかのように対物レンズに導かれる。その後、対物レンズを通過したレーザービームは試料上に集光かつ走査される。ここでは、AO 偏向素子に TeO_2 の異方ブラッグ回折を利用した素子¹⁸⁾を、対物レンズに NA 0.25 の顕微鏡用対物レンズを使用している。光学系の駆動条件は、(i)レーザー波長: 488 nm (514 nm), (ii) AO 偏向素子入力周波数: 70~120 MHz (回折角: 約 3.0~5.2°), (iii) 走査量: 試料上、約 300 μm である。また、Z 方向位置検出器には空気マイクロメータを採用し、偏向に伴う焦点位置の変化を測定した。さらに、ビーム偏向位置はレーザー干渉計を用いて、試料の送り量から測定した。

図 11 は走査速度をパラメータとし、偏向距離で正規化した偏向位置に対する焦点位置の変化を示す¹⁹⁾。図よ

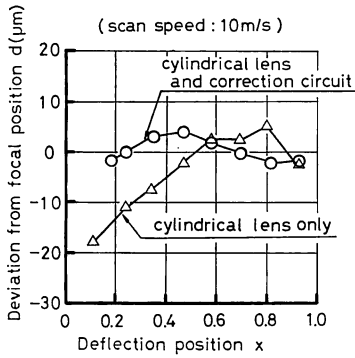
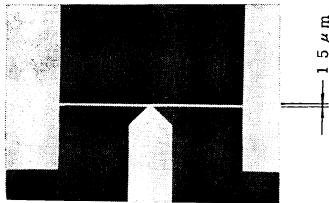
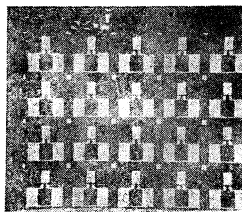


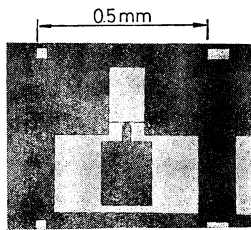
図 12 円筒レンズ効果補正を用いた場合のレーザー偏向位置に対する焦点位置の変化¹⁹⁾
 ○ : 円筒レンズ補正と補正回路による場合,
 △ : 円筒レンズ補正のみの場合



(a) レティクル上のSD層パターン
 (Pb・Te・Se遮光膜)



外観図 (Siウェーハ上)
 (レジスト: AZ1350J)



トランジスタのSD部
 (Siウェーハ上)
 (レジスト: AZ1350J)

(b) GaAs-FET SD層パターン

図 13 図 10 による GaAs-FET SD 層レティクル直接加工とそれを用いた 1/10 縮小投影露光装置でのレジストパターン形式¹⁷⁾

り、低速偏向時の焦点位置の変化と高速偏向時の変化とを比較すると、4.1 節で説明した現象が観測されることがわかる。すなわち、(1)焦点位置の変化量は偏向位置に無関係な平行移動量と偏向位置に関係する変化量とが存在する。(2)とくに、偏向位置に関係する変化量は高速偏向時に顕著となる。

4.2 節で述べた補正方法を用いて、円筒レンズ効果を補正した結果を図 12 に示す¹⁹⁾。図は従来から採用されている補正用円筒レンズのみを用いた場合および補正用円筒レンズと補正回路を用いた場合の高速偏向時の偏向

位置に対する焦点位置の変化を示す。前者の場合、平行移動量は補正できるが、偏向位置に関係した変化量は補正できない。一方、後者は補正回路を併用したことにより、焦点位置変化の幅が約 $6 \mu\text{m}$ と対物レンズの焦点深度内に補正できることを示している。しかし、わずかであるが平行移動成分の誤差が残っており、焦点変動は $\pm 4 \mu\text{m}$ である。このため、ビーム走査と直角方向のビーム径は約 $1.2 \mu\text{m}$ であるのに対して、走査方向のビーム径は最大約 $2 \mu\text{m}$ と若干大きくなる。このことは、さらにレーザービームを微細に絞り、かつ高速レーザービーム走査を実現するには 4.2 節で示した補正を厳密に行なうことが必要であることを意味している。

図 13 は図 10 の装置を用い、レーザー加工により直接にレティクルパターンを形成した結果である^{17,20)}。図には 1/10 縮小投影露光法により Si ウェーハ上に形成したレジストパターンも合わせて示した。レーザー加工には Ar イオンレーザーを使用し、試料上のレーザービーム走査速度 10 m/s (約 20 kHz) の高速走査を実現し、スループット $30 \text{ min}/100 \text{ mm}^2$ 、最小加工線幅 $3 \mu\text{m}$ 、加工精度 $0.9 \mu\text{m}$ 、位置精度 $0.6 \mu\text{m}$ の性能を達成している。したがって、ここで紹介した走査技術はレーザー描画等の高速走査手段として利用できるとともに、QTAT 技術としても利用できることを示している。

5. おわりに

今日、半導体プロセスにおいて、レーザービーム走査技術の利用により実用化されている装置は寸法測定機、冗長ビット修正機等であり、きわめてわずかな分野である。ここで述べた内容は、今後半導体プロセスに必要なレーザービーム走査技術について、最近の動向および研究開発のトピックスを紹介した。とくに、高速高精度なレーザービーム走査技術の研究開発は必要不可欠であり、AO 素子を利用した場合の可能性について解説した。さらに、将来の半導体市場において、少なくとも少量多品種製品が増加することは確実である。また、半導体市場に参入する企業数は年々増加するものと考えられ、微細化技術ばかりでなく、経済性を重視した QTAT 技術の研究開発も必要であり、レーザービーム走査技術が再び見直され、利用されることを確信している。

なお、本文をまとめるに当たり、適切な助言をしていただいた日立製作所中央研究所の齊藤進、有本昭両主任研究員に感謝いたします。

文 献

- 1) M. J. Cowan, D. R. Herriott, A. M. Johnson and A. Zacharias: *Bell Syst. Tech. J.*, **49** (1970) 2033-2041.
- 2) D. R. Herriott, R. J. Collier, D. S. Alles and J. W. Stafford: *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-22** (1975) 385-392.
- 3) M. I. Cohen, B. A. Unger and J. F. Milkosky: *Bell Syst. Tech. J.*, **47** (1968) 385-405.
- 4) J. M. Moran and T. E. Saunders: *Rev. Sci. Instrum.*, **46** (1975) 1267-1272.
- 5) J. M. Moran and R. L. Ruth: *Bell Lab. Rec.*, **57** (1979) 192-198.
- 6) 浜島宗樹: *精密機械*, **51** (1985) 2219-2222.
- 7) 湊 修, 佐々木敏夫, 増原利明, 西村光太郎, 宮内建興: *電子通信学会論文誌*, **J 66-C** (1983) 903-910.
- 8) 垂井康夫: *超 LSI 技術* (オーム社, 東京, 1981) p. 279.
- 9) *日経エレクトロニクス*, 3月24日号 (1986) 324.
- 10) *日経エレクトロニクス*, 9月9日号 (1985) 166.
- 11) 早馬 修, 谷川史郎: *精密機械*, **51** (1985) 2172-2176.
- 12) G. Westerberg: *L'onde Electr.*, **58** (1978) 742-746.
- 13) *Solid State Technol.*, Feb. (1986) 53-54.
- 14) D. B. MacDonald, M. Nagler, C. Van Peski and T. R. Whitney: *Proc. SPIE*, **470**, Optical Microlithography III (1984) 212-220.
- 15) L. D. Dickson: *Appl. Opt.*, **11** (1970) 2196-2202.
- 16) S. Hosaka, *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, in contribution.
- 17) 保坂純男, 瀬谷英一, 高梨明紘: “レーザーパターンジェネレータの試作”, 昭和60年秋季第46回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 3P-H-11 (1985) p. 63.
- 18) T. Yano, M. Kawabuchi, A. Fukumoto and A. Watanabe: *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1975) 689-691.
- 19) 保坂純男, 瀬谷英一, 原田達男, 高梨明紘: *光学*, **13** (1984) 325.
- 20) 保坂純男, 瀬谷英一, 寺尾元康, 黒崎利栄, 高梨明紘: “レーザー加工による直接パターン形成と縮小投影露光”, 昭和60年春季第32回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 29a-H-8 (1985) p. 295.
- 21) たとえば S. Hosaka, H. Hayakawa, M. Ichihashi, K. Asanami, S. Nishi and M. Migitaka: *Proc. Microcircuit Engineering '79* (Institute of Semiconductor Electronics, Aachen, 1979) p. 7.