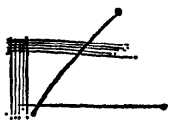


展望



超 LSI 用電子ビーム露光法†

後藤 英一†† 相馬 嵩††  
出澤 正徳†† 佐々木 建昭††

1. はじめに

ポケット電卓から超高性能計算機に至るまで、最近のエレクトロニクス製品の小型化、高性能化、低価格化は、まことに目覚ましいものがある。このエレクトロニクス技術の進歩は、数 mm 四方のシリコンチップ上に、数千個の素子を配置した LSI (Large Scale Integration) に象徴される。最近では、1チップに数十万個もの素子を配置した、更に高性能な超 LSI 技術の確立を目指し、各所で活発な研究開発が進められている。LSI 製造技術は、微細加工技術、プロセス技術、デバイス技術、材料技術、回路設計技術などから成る総合技術であり、各技術の均衡のとれた発展が必要である。この LSI 技術が、エレクトロニクス各分野に及ぼす影響は、計り知れないものがあり、それらが近代産業を支える重要な技術の一つとなっている。電子ビーム露光技術は微細加工技術の中でも特に重要なものの一つである。電子ビーム露光技術に関する展望が、最近他にも発表されているが<sup>L16), L17), L20)</sup>、本稿では、その基礎となる電子幾何光学における最近の進歩を中心に解説を試みたい。

1.1 光を用いた露光技術

現在の LSI 製造に用いられている回路パターン形成技術は、光を用いて写真と類似の手法により、マスクパターンをシリコンウェファ上に転写する方法によっている。研磨されたシリコンウェファに感光剤(フォトリソグ)を塗布し、その上にマスクパターンを投影して露光を行う。溶剤に対するレジストの溶解度の変化を利用し、マスクパターンに従ってウェファ面の露出したパターンが得られる。これに導体や不純物を蒸着し、拡散処理など種々のプロセスを施すことにより、ウェファ上に所望の回路を作り上げる。なお、

ここで用いるマスク自身も、原パターンから光を用いた縮小投影により作られる。

光による転写技術は、用いる光の波長より微細なパターンは転写できないと言う物理法則上の限界に突当ってしまった。具体的には、光による方法では 1 μm 以下(サブミクロン)領域のパターンを形成することは困難である。この事情は顕微鏡発達史の歴史と類似した点がある。光学顕微鏡の分解能は、既に前世紀に、約 1 μm とする光の波長から来る限界に達してしまった。これを抜本的に改善したのは、1930 年代に開発が始まった電子顕微鏡であった。今日の電子顕微鏡の分解能は、光学顕微鏡のその約千倍にも達している。微細加工においても、1 μm より微細なパターンの露光には、光に代わり、より波長の短い電子線あるいは X 線を用いることが必要になってくる。

1.2 種々の露光技術の比較

表-1 は、光、電子線及び X 線を用いたパターン形成法の特徴をそれぞれ示す。密着法とは、パターンマスクとレジストを塗布したターゲット面とを密着させ露光する方法である。マスクがターゲット面と接触するためマスクの寿命が短いことが問題となる。

マスク投影法は、マスクとターゲットの間に投影レンズを置き、マスクの像をターゲット面に結像させて露光を行う方法で、マスクの消耗がないと言う特徴がある。一括投影では所望の分解能が実現できない場合、部分投影によりマスクとターゲットを二次元的に走査して全体を露光する方式もある。X 線を用いる露光法でシンクロトロン放射のようにコリメートされた光源が得られる場合には、レンズを使用しない影絵式

表-1 露光方式の比較

	密着法	マスク投影法	直接パターン形成法	限界分解能
光	○	○	△	≧1 μm
X 線	○	○	△	≦0.1 μm
電子ビーム	○	○	○	≦0.1 μm

○: 実現可 △: 実現困難

† Electron Beam Lithography for Advanced LSI Fabrication by Eiichi GOTO, Takashi SOMA, Masanori IDESAWA and Takeaki SASAKI (Information Science Laboratory, the Institute of Physical and Chemical Research).

†† 理化学研究所情報科学研究室

投影法が可能である。

直接パターン形成法とは、パターンの分解能程度の太さに絞ったビームでターゲット面上を走査して、パターンデータから直接パターンを描画する方式である。電子ビームを用いた走査型描画装置は、既に実用に供されているが、ホログラムを利用した光走査方式、凹面鏡を利用したX線スポット走査方式などの可能性も検討されている。直接パターン形成法は、ウェファへの直接露光ばかりでなく、マスク作製のための露光にも利用される。この走査型電子ビーム露光装置は、サブミクロンパターンの描画に用いられるばかりでなく、その描画の柔軟性の特徴を生かして、光露光用のマスク製造のために既に実用化されている。電子ビームによる直接露光方式を生産工程で用いる場合、そのスループットが問題となる。スループットの高い装置の開発が現在切望されている。

サブミクロン領域の露光に、電子ビームあるいはX線を用いた装置に移行する段階として、光学的な直接露光装置が現在注目されている。これは、チップパターンあるいはそのサブパターンをいくつか用意しておき、それを選択しながらウェファに直接露光する方式である。紫外線を用いて1 $\mu\text{m}$ 程度の分解のものが実用化されている。

## 2. 電子ビーム露光法

### 2.1 種々の描画方式

図-1 は実用化されている四種の電子ビーム描画方式の原理を示す模式図である。また表-2 はそれらの発達をまとめたものである。図-1(a)のスポット走査方式は、直径0.1 $\mu\text{m}$ 程度に細く絞ったビームを電子的に偏向することにより、ターゲット面を走査しビームのオンオフ操作との組合せにより所望のパターンを

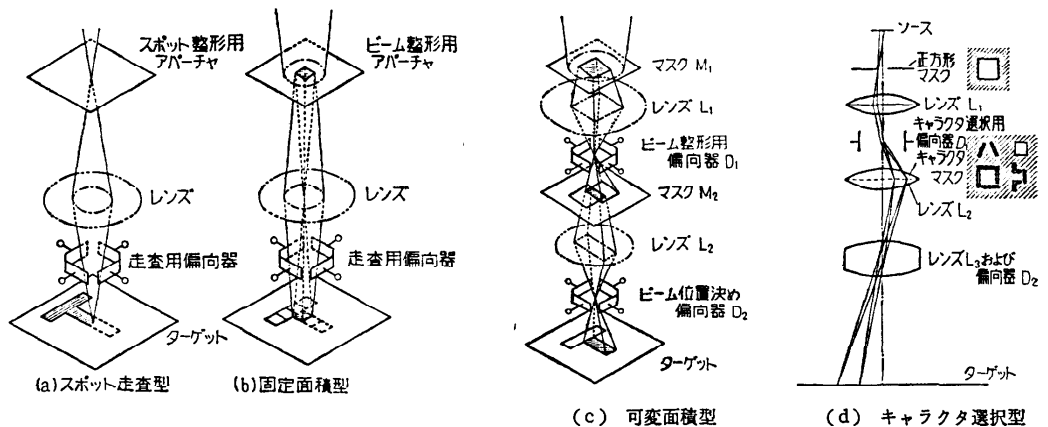


図-1 電子ビームパターン描画方式

表-2 電子ビーム露光装置

形式	ビーム形状 ( $\mu\text{m}$ )	分解能 ( $\mu\text{m}$ )	ビーム電流 (A)	走査範囲	発表年	発表者	参考文献
1 JSM-1	0.1 $\phi$	0.1	10pA	1 $\times$ 1mm <sup>2</sup>	1966	JEOL	—
2 JBX-2A	0.35 $\phi$	0.35	0.01 $\mu\text{A}$	2 $\times$ 2mm <sup>2</sup>	1968	JEOL & ETL	L 1)
3 EBES	0.25~0.5 $\phi$	0.25~0.5	0.1 $\mu\text{A}$	0.128~0.256mm	1975	BTL	L 4)
4 VS-1	0.05 $\phi$	0.05	1 $\mu\text{A}$	5 $\times$ 5mm <sup>2</sup>	1975	IBM	L 6)
5 EL-1	2.5 $\square$	0.4	3 $\mu\text{A}$	5 $\times$ 5mm <sup>2</sup>	1976	IBM	L 8)
6 JBX-6A	0.5~2.5 $\square$	0.5	1 $\mu\text{A}$	2 $\times$ 2mm <sup>2</sup>	1977	IPCR & JEOL	L 10)
7 —	0.6~2 $\square$	0.6	2 $\mu\text{A}$	4 $\times$ 4mm <sup>2</sup>	1977	IBM	L 11)
8 —	0.5 $\square$	0.5	0.1~0.4 $\mu\text{A}$	0.256mm	1977	BTL	L 12)
9 —	—	—	—	—	1977	Thomson	L 13)
10 —	0.1~25 $\square$	0.1	> $\mu\text{A}$	7 $\times$ 7mm <sup>2</sup>	1978	IPCR	—

【注】 1. SEM (走査顕微鏡) JEOL: 日本電子(株)

2. スポット走査方式, ETL: 電総研

3. スポット走査方式, BTL: ベル研究所

4. スポット走査方式, IBM

5. 固定面積型

6. IPCR (理研), 6, 7, 8, 9: 可変面積型

9. トムソン CSF (仏)

描く。この場合、テレビ画面のように全面を一定の順序で走査するラスタ方式と、描画すべきパターンに沿ってビーム偏向するベクタ方式とがある。電子ビームによる高分解走査を行う点で、ラスタ方式の露光装置は走査型電子顕微鏡 (SEM) と原理的に全く同じである。実際、初期の露光実験には SEM が用いられた。我が国で最初に電子ビーム露光装置を試作した日本電子 (株) においても、その一号機 JBX-2A は SEM の一号機 JSM-1 と同時に開発されている。垂井たちは、1968 年世界に先駆けて、この電子ビーム露光装置を使い直接露光による MOS トランジスタの試作に成功している<sup>L1)</sup>。

ベル研究所の EBES2 は、ラスタ方式で、電子ビームを 0.128 mm 幅で一次的に走査すると同時に、ステージを走査方向とは垂直な方向に一定速度で移動させることにより二次元的な走査を行っている。一方 IBM 社の VS-1 は、ベクタ方式であり、ビームの走査範囲は 5 mm × 5 mm の正方形である。

図-1(b)は固定面積型方式で<sup>E9)</sup>、ターゲット面上で一定面積の矩形断面をもったビームを用い、ショット露光による矩形の組合せによるパッチワークとして所望のパターンを描画する。IBM 社の EL-1 がこの方式であり、ビームの断面は一辺 2.5  $\mu\text{m}$  の正方形である。

図-1(c)の可変面積型は<sup>L10)~L13)</sup>、ターゲット面上でのビーム断面形状を可変にする方式である。描画すべきパターンに応じて、ビーム断面を変化させることにより、固定面積型よりも効率よく露光を行うことができる。

図-1(d)はキャラクタ選択方式で可変面積型の一つと考えることができる<sup>L7), L19)</sup>。あらかじめ決められた形状を持つ複数のアパーチャをもつマスクを用意し、ビームの偏向によりその一つを選択して対応する断面形状のビームを得る方式である。この方式は、磁気バブル素子に用いられる磁性薄膜パターンなどのように、限られた要素パターンから成るパターンの露光に適した方式と言える。

## 2.2 可変面積型露光装置

図-1(c)に示す通り、正方形のアパーチャをもった二枚のマスク M1, M2 を用意し、その間に配置した投影レンズ L1 により、第 1 のアパーチャ像を第 2 のアパーチャ上に丁度重なるように結像させる。更に両マスクの間に配置した面積可変偏向器により、この第 1 のアパーチャ像を移動させることにより、第 2 の

アパーチャを通過するビームの断面形状を変化させる。第 2 のアパーチャを通過したビームは、後段の投影レンズ L2 及び偏向器 D2 によりターゲット上の所望の位置に縮小投影される。この可変面積型露光方式は、1977 年の電子イオンフォトンビーム応用国際シンポジウムで、我々のグループの他に、IBM、ベル研などからも独立に発表された。この原理に基づく露光装置としては日本電子 (株) の JBX-6A が、既に実用に供されており、ビームの形状は矩形で、その可変範囲は 1~25  $\mu\text{m}$  である。

## 3. 電子幾何光学の進歩

電子ビーム露光装置のように、電子ビームを利用した装置の設計には、電磁界中での電子の振舞いを知る必要がある。電子ビームによる結像に関する学問を電子光学と言う。光学の場合と同様、像の不完全さを幾何光学的収差と呼ぶ。幾何光学と言う言葉は、電子の流れを光線のように幾何学的な線と看做して結像関係を調べる場合に用いられる。このことは、電子の波動としての性質、あるいは粒子としての性質を無視することに相当するが、この幾何光学的収差理論は露光装置の設計に十分役立つことが知られている。以下では、主としてこの幾何光学収差について述べる。偏向系を含まない結像系に関する理論は 1950 年代に既に完成しており、Glaser<sup>E1)</sup>、Sturrock<sup>E2)</sup>、El-Kareh<sup>E3)</sup> 等による著書がよく知られている。

### 3.1 偏向系の収差理論

偏向系を含む結像系の収差理論は、純粋な結像系の理論程には深く研究されていなかった。1960 年代までの理論は、すべて集束系と偏向系とを別々に考えていたと言う点で未完成であった。効率のよい電子ビーム露光装置の設計にはこれらの理論を完成させる必要がある。集束電磁界と偏向電磁界が互いに重なった系を統一的に扱う収差理論は、最近完成したと言ってよい。この理論の一つは MOL (Moving Objective Lens) 理論がある。MOL とは、集束電磁界に適当な偏向電磁界を重ね合わせることにより、その集束電磁界を光軸と垂直な方向に移動させるものである。この MOL 概念は、偏向系の収差理論展開において、非常に有用なことが示された。

収差理論は、電子光学の理論の一つとして、非常に専門的な分野であり、その説明には複雑な式が必要となる。ここでは、これに深く立入ることは避けて、基本的な事柄について簡単に触れることにする。図-2

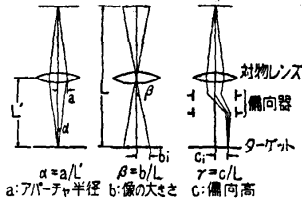


図-2 電子軌道を指定する3つのパラメータ

は、電子ビームの集束偏向系における電子軌道を指定する基本的な三つのパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma$  を示す模式図である。ここではアパーチャ像をターゲット面上に投影する最終段のレンズ（対物レンズ）について考える。アパーチャ面からターゲットまでの距離を  $L$ 、対物レンズからターゲットまでの距離を  $L'$ （作業距離）で表わす。 $\alpha$  はターゲット面でのビームの入射角で、

$$\alpha = F/2 = a/L' \quad (1)$$

で定義される。ここで、 $a$  は対物レンズの開口半径、 $F$  はレンズの明かるさを表わす、いわゆる  $F$  ナンバーである。 $\beta$  は像の大きさを表わすパラメータで

$$\beta = b_i/L \quad (2)$$

で定義される。 $b_i$  はターゲット面での像の大きさを表わす。 $\gamma$  は偏向量を表わすパラメータで、ターゲット面での偏向高  $c_i$  を用いて

$$\gamma = c_i/L \quad (3)$$

で定義される。更にビームエネルギー（光の場合の色に相当する） $V$  の変動を表わすパラメータとして

$$\delta = \Delta V/V \quad (4)$$

を考える。 $V$  はビームエネルギーを電圧に換算した値である。 $\Delta V$  は、陰極の温度効果や、後述の Boersch 効果による  $V$  の変動分を表わす。光軸を  $z$  軸にとり、それに垂直に  $x, y$  軸をとると、電子の軌道は  $z$  の関数として、複素数表示を用いて、

$$w = x(z) + iy(z) \quad (4)$$

と表わされる。理想的な結像に関与する近軸軌道  $w^0$  は、三つの基本軌道  $a(z), b(z), c(z)$  の線型結合として、

$$w_1 = \alpha a(z) + \beta b(z) + \gamma c(z) \quad (5)$$

と表わすことができる<sup>E7)</sup>。一般の軌道  $w$  と  $w_1$  との差としての収差  $\Delta w$  は一般に、

$$\Delta w = f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (6)$$

と表わされる。 $\Delta w$  を  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  の各パラメータについて Taylor 展開した際の各項は収差の成分と呼ばれ、それぞれ名前を付けて分類されている。例えば、 $\delta$  を含む項は色収差の成分と呼ばれる。

表-3 は、最近の収差理論の進歩及び、それに基づく集束偏向系の設計計算の結果をまとめたものである。偏向系を含まない結像系 ( $\gamma=0$ ) の収差は関数  $f(\alpha, \beta, 0, \delta)$  を、スポット走査型の集束偏向系 ( $\beta=0$ ) の収差は関数  $f(\alpha, 0, \gamma, \delta)$  をそれぞれ考えればよい。しかし固定面積型及び可変面積型の集束偏向系の設計には、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  のすべてを考慮した収差関数を用いなければならない。

大岩、後藤、小野（表-3 #1）は MOL 概念を導入し、スポット走査系に対して、偏向に伴うすべての収差が除去できることを示した。すなわち  $f(\alpha, 0, \gamma, 0) = 0$  ( $\alpha$ ) となるような関数  $f$  が存在すること数値計算により示した。Munro (#3) は、電磁的なスポット走査型の集束偏向系 ( $\beta=0$ ) について、集束レンズ磁界と偏向磁界とが重なり合った場合にも適用できる一般的な収差公式を導びいた。後藤、相馬 (#6) は、電磁収束偏向系に対し走査ビームの大きさを考慮して Munro の結果を拡張した。また MOL 概念を用いて偏向収差が除去できることを解析的に示した。理論の展開に当り偏向パラメータを考慮した回転不変系を考えるとにより動的補正を一般的に扱い、偏向コイル、非点補正コイル（スティグメータ）、歪曲補正コイルの回転自由度を明らかにした。前記公式は、この自由度も考

表-3 集束偏向系に関する電子光学の進歩

番号	集束*	偏向*	内 容	発表年	著 者	参考文献
1	M	M	$\exists f, f(\alpha, 0, \gamma, 0) = 0(\alpha)$	1971	大岩, 後藤, 小野	E 5)
2	M	M	$\min  f(\alpha, 0, \gamma, 0) $	1973	Owen, Nixon	E 6)
3	M	M	$f(\alpha, 0, \gamma, \delta)$	1974	Munro	E 7)
4	M	M	$\min  f(\alpha, 0, \gamma, \delta) $	1975	Munro	E 8)
5	M	M	$\min  f(\alpha, 0, \gamma, \delta) $	1975	Pfeiffer	E 9)
6	M	M	$\exists f, f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0(\alpha, \beta, \delta)$	1977	後藤, 相馬	E11)
7	M	M	$\min  f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) $	1977	後藤, 相馬, 出沢	L10)
8	ME	ME	$f(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$	1977	相馬	E13)
9	M	E	$\min  f(\alpha, \beta, \gamma, \delta) $	1979	相馬	E16)

\* M: 電磁式, E: 静電式

慮した一般的なものである。動的スティグメータの回転自由度については、従来よく認識されておらず、非等方的非点収差 (anisotropic-astigmatism) は動的補正では消去できないと言う誤った記述も見受けられた<sup>6)</sup>。相馬 (#8) は、静電、電磁両系から成る最も一般的な集束偏向系について、相対論的な加速電圧のビームにも適用できる公式を導びいた。公式は 80 頁にも及ぶもので、その誘導には計算機による数式処理システム REDUCE が用いられた (後述)。

表-3 の他の項で関数  $f$  に "min" が付されているものは、最適化計算あるいは実験により収差を極小化した結果を与えている。我々のグループによる設計計算においては (#1, 6, 7, 9), 収差を極小化するばかりでなく、ターゲットへの垂直入射の条件を満たすように考慮されている。これはターゲットとしてのウェファの変形による平面度の劣化に対する余裕度を大きくできる点で重要である。

### 3.2 分解能及び露光速度の限界

前項で述べた最適化設計の結果、露光装置の分解能を決める収差は球面収差であることが示される。球面収差は集束コイルの位置、形状などのパラメータを最適化しても消去できないことが理論的に示されている。球面収差  $\Delta w_s$  を、

$$\Delta w_s = L S \alpha^3 \quad (7)$$

と表わした場合、係数  $S$  は、0.5 より小さくできない。分解能を決めると式(7)から  $\alpha$  が決まる。高い電流値のビームを得るには、輝度の高い陰極を用いなければならない。ところで、ビーム電流値も無制限に大きくできないことが知られている。電流値がある値より大きくなると、電子同士の相互作用のために、幾何光学的な収差以外に像のぼけ(収差)を生ずる効果が現われてくる。電子は互いに反発し、衝突し合うことにより、軌道がずれてくる。これらの収差は、その原因により、Boersch 効果、空間電荷効果などに分けて考えることができる。Boersch 効果は<sup>11)</sup>、その発見者の名前をとって、そう呼ばれているが、電子密度の高い領域を電子が通過すると、電子同士による相互作用のために、陰極温度から期待されるエネルギー変動より大きな変動を獲得する効果である。この効果は一種の色収差として現われるが、高いビーム電流の露光装置などで問題となる (この効果の解釈についてはまだ定説がない)。

空間電荷効果による収差は、ビーム中のある電子に着目した場合に、他の電子からの影響を空間的な電荷

分布で置替えて、その影響による軌道のずれとして求めることができる。適当な近似のもとに、空間電荷効果による収差  $\Delta w_{sc}$  は

$$\Delta w_{sc} \approx K L I / (V^{3/2} \alpha) \quad (8)$$

と表わすことができる。ここで  $I$  はビーム電流値、係数  $K$  は物理定数  $\sqrt{m/2e}$  である。但し  $m, e$  は電子の静止質量及び電荷を表わす。式から明らかなように空間電荷による収差は、鏡筒長  $L$  及び全電流に比例し  $\alpha$  に反比例することがわかる。JBX-6A (表-3 #6) による実験の結果、収差の値が式(8)に可成りよく合っていることから、現段階の露光装置における収差は空間電荷効果に大きく起因しているものと考えられる。式(7)及び(8)から  $\alpha$  には最適値があることがわかる。同式から、加速電圧 20 kV、鏡筒長  $L$  が 10 cm、球面収差係数  $S$  を 1 と見積ると、0.1  $\mu\text{m}$  の分解能が、1  $\mu\text{A}$  のビームで実現できることがわかる。露光時間とは、ターゲット面上のある面積の範囲に一定の電荷を載せるに必要な時間である。従ってビーム移動の時間を除いた正味の露光時間は、用いるビームの太さには無関係であり、ビームの電流値によって決まることに注意したい。

以上の考察の結果、結論として、分解能 0.1  $\mu\text{m}$  の走査型電子ビーム露光装置について、次のような性能が期待できる。

- 1) 感度  $10^{-6}$  クーロン/cm<sup>2</sup> のレジストを用いる場合 1 cm<sup>2</sup>/sec の露光速度が実現可能である。この速度は 2 インチウェファ当たり 20 秒に相当する。
- 2) この露光速度を 0.1  $\mu\text{m}\phi$  のスポット走査方式で実現するためには、毎秒  $10^{10}$  点の走査速度 (10 GHz) が必要となり、実現は非常に困難である。
- 3) スポット走査方式で 1  $\mu\text{A}$ 、0.1  $\mu\text{m}\phi$  のビームを実現するためには高輝度の陰極が必要であり、恐らく電界放射型の陰極が用いられることになり、陰極設計の自由度が狭まることになる。
- 4) 以上の 3 点から面積露光方式は、高速露光を実現するための非常にすぐれた方式と考えられる。一方、高速性をそれ程要求しない用途には、構造が簡単なスポット露光方式が経済的であろう。

現在実用化されている走査型電子ビーム露光装置では、その電子的走査範囲は数 mm 角程度に限られている。そのため電子ビームの位置決め精度と同程度の精度をもったステージの移動との組合せにより広い面積の露光を行っている。全体の露光時間に対して、ステージの移動、位置決め時間は無視できず、電子的

$$\begin{aligned}
 (A1) \quad k_3 = & 1/[a^2 a^2]_{20} \left\{ \begin{aligned}
 & +3/64 i \eta \epsilon_1^2 / \epsilon_1^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & -1/8 i \eta \epsilon_1 / \epsilon_1 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & -1/32 i \eta \epsilon_1^2 / \epsilon_1 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & +3/64 i \eta \epsilon_1^2 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & -1/8 i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & +1/32 i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & +i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 \\
 & -1/16 a^2 a^2 \\
 & +1/16 a^2 a^2 \\
 & -1/8 i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & +i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / (1/16 a^2 a^2) \\
 & +1/16 a^2 a^2 \\
 & -1/16 i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2 \\
 & -1/32 i \eta \epsilon_1 F^2 f'' / (\epsilon_1 F)^2 / a^2 a^2
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

図-3 収差公式の一部

走査範囲を広げ、ステージの移動回数を減らすことは、スループットの向上に直接影響を及ぼす。

広い範囲を高精度で電子的に走査する方式として、複眼レンズ (Fly's Eye Lens) による方式が知られており、既に、電子ビーム・アクセス・メモリ (F4, F5, F7)、高精度ブラウン管 (F2, F3, F6) など利用されている。これらの方式を露光装置に適用し、ウェファ全面を電子的に走査出来る装置も決して不可能ではないであろう。

### 3.3 電子光学と数式処理

前述したように表-3, #6, #8における収差公式の誘導には、数式処理システムを利用した。結果は図-3のような式が延々と80頁にも及ぶ。このような長い式を手計算で正しく求めることは容易ではなく、少なくとも数カ月、悪くすると1~2年もの時間を要するであろう。図-3は、数式処理システムからの出力結果を文書編集清書システムにより編集して、レーザプリンタに出力したものである。このように印刷用の版下が人手を介さずに直接計算機の出力として得られることは、複雑な式の印刷に際して、誤植をなくすることが出来る点で意義が大きい。

一方、数式処理システムにより導かれた公式をもとに、数値計算用のプログラムを正しく作成することも容易なことではない。数式処理システムは、公式の誘導を行うだけでなく、必要に応じて数値計算用のプログラムを自動的に生成する機能も備わっている。

電子光学に数式処理を適用しようという試みは、Hawkes によっても報告されている<sup>E12)</sup>。将来、数式処理システムの普及により、電子光学ばかりでなく他の分野にも広く適用できるものと期待される。数値計算向きの計算機に数式処理システムを実現する場合その効率よい実行は望めない。理化学研究所では、現在

FLATS 計画と呼ばれる数式処理専用計算機の製作のための作業を進めつつある。

## 4. むすび

電子光学に関する種々の考察から、分解能 0.1  $\mu\text{m}$ 、露光速度 1  $\text{cm}^2/\text{sec}$  のパターン描画装置の可能性を示した。可変面積型は高速性が要求される量産用の装置に、スポット走査型は、融通性が要求される実験用の装置、あるいはより安価な装置に採用されるだろう。このような高速電子ビーム描画装置が、LSI 技術の将来にどのような影響を及ぼすかを予測することは非常に困難である。しかし、サブミクロンパターン描画において電子ビーム技術がボトルネックとならないことは確信をもって言える。最近、露光装置などに関連して電子光学に対する関心が高まって来ているが、この古くて新しい学問が、数式処理などの新しい手法を取り入れて、更に発展することを願っている。

最後に、実際面で種々の有益な助言をいただいた日本電子(株)の宮内、田中、染谷の各氏に感謝の意を表したい。

## 参考文献

### 電子ビーム・露光関係

- L1) 垂井, 伝田, 場馬, 宮内, 田中: 集積回路用電子ビーム露光装置の試作, 信学論 (C), 51-C, 2, pp. 74-81 (1968).
- L2) Miyauchi, S., Tanaka, K. and Russ, J. C.: IC Pattern Exposure by Scanning Electron Beam Apparatus, [Solid State Technol., p. 43 (1969).
- L3) Fontijn, L. A.: An Electron Exposure System for Recording and Printing, Thesis, Delft Univ. (1972).
- L4) Herriott, D. R., Alles, D. S., Collier, R. J. and Stafford, J. W.: EBES-A Practical Electron Lithographic System, IEEE Trans., ED-22, 7, p. 385 (1975).
- L5) Alles, D. S., Ashley, F. R., Collier, R. J., Gere, E. A., Herriott, D. R., Johnson, A. M. and Thomson, M. G. R.: A Second Generation EBES, Suppl. IEDM Tech. Digest, p. 1 (1975).
- L6) Speth, A. J., Wilson, A. D., Kern, A. and Chang, T. H. P.: Electron Beam Lithography Using Vector-scan Technique, J. Vac. Sci. Technol. 12, p. 1235 (1975).
- L7) Soma, T., Idesawa, M. and Goto, E.: A New Electron Beam Exposure Scheme of Scanning Type, IEDM Tech. Digest, p. 20 (1975).
- L8) Yourke, H. S. and Weber, E. V.: A High-Throughput Scanning-Electron-Beam Lithogra-

- phy System, IEDM Tech. Digest, p. 431 (1976).
- L9) Mauer, J. L., Pfeiffer, H. C. and Stickel, W.: Electron Optics of the Electron-Lithography System, EL-1, *ibid.*, p. 434 (1976).
- L10) Goto, E., Soma, T. and Idesawa, M.: Design of a Variable Aperture Projection and Scanning System for Electron Beam, *J. Vac. Sci. Technol.* 15(3), p. 883 (1978).
- L11) Pfeiffer, H. C.: Variable Spot Shaping for Electron Beam Lithography, *ibid.* p. 887 (1978).
- L12) Thomson, M. G. R., Collier, R. J. and Herriott, D. R.: A Double Aperture Method of Producing Variably Shaped Writing Spots for Electron Lithography, *ibid.*, p. 891 (1978).
- L13) Trotel, J.: E-Beam Dynamic Shaping, *ibid.*, p. 872 (1978).
- L14) Scott, J. P.: Recent Progress on Electron Image Projection, *ibid.*, p. 1016 (1978).
- L15) Speidel, R. and Mayer, M.: Electron Beam Projection System with Photocathode, *Optik*, 48, p. 247 (1977).
- L16) 相馬: 可変寸法矩形電子ビーム露光技術, 電子材料, 11, p. 89 (1977).
- L17) Goto, E., Soma, T., Idesawa, M. and Sasaki, T.: Electron Beam Lithography for Advanced LSI Fabrication, *Proc. NCC*, p. 1223 (1978).
- L18) Cogswell, G., Miyauchi, S., Tanaka, K. and Goto, N.: Variable Shaped Electron Beam Lithography, 8th Int'l Conf. Electron and Ion Beam Sci. and Technol. (1978).
- L19) Pfeiffer, H. C. and Langner, G. O.: Advanced Beam Shaping Techniques for Electron Lithography, *ibid.*, (1978).
- L20) 桂木久雄: 電子ビーム露光技術, 信学誌, 8, p. 884 (1978).
- 電子光学関係
- E1) Glaser, W.: *Grundlagen der Elektronenoptik*, Springer Verlag, (1952).
- E2) Sturrock, P. A.: *Static and Dynamic Electron Optics*, Cambridge Univ. Press (1955).
- E3) El-Kareh, A. B. and El-Kareh, J. C. J.: *Electron Beam, Lens, and Optics*, Vol. 1, 2, Academic Press (1970).
- E4) Septier, A.: *The Struggle to Overcome Spherical Aberration in Electron Optics*, *Adv. Opt. Electr. Microscopy*, Academic Press (1966).
- E5) 大岩, 後藤, 小野: 電子ビーム走査システムにおける三次収差の除去について, 信学論, 54-B, 11, p. 730 (1971).
- E6) Owen, G. and Nixon, W. C.: Aberration Correction for Increased Line per Field in Scanning Electron Beam Technology, *J. Vac. Sci. Technol.* 10, p. 983 (1973).
- E7) Munro, E.: Calculation of the Optical Properties of Combined Magnetic Lenses and Deflection Systems with Superimposed Fields, *Optik*, 39, p. 450 (1974).
- E8) Munro, E.: Design and Optimization of Magnetic Lenses and Deflection Systems for Electron Beams, *J. Vac. Sci. Technol.* 12, p. 1146 (1975).
- E9) Pfeiffer, H. C.: New Imaging and Deflection Concept for Probe-forming Microfabrication Systems, *ibid.*, p. 1170 (1975).
- E10) Crewe, A. V. and Parker, N. W.: Correction of Third-order Aberration in the Scanning Electron Microscope, *Optik* 46, p. 183 (1976).
- E11) Goto, E. and Soma, T.: MOL (Moving Objective Lens) Formulation of Deflective Aberration Free System, *ibid.*, 48, p. 255 (1977).
- E12) Hawkes, P. W.: Computer Calculation of Formulae for Electron Lens Aberration Coefficients, *ibid.*, 48, p. 29 (1977).
- E13) Soma, T.: Relativistic Aberration Formula for Combined Electric-Magnetic Focusing-Deflection System, *ibid.*, 49, p. 255 (1977).
- E14) Hearn, A. C.: *REDUCE2 User's Manual*, Univ. Utah. Salt Lake City, Utah (1973).
- E15) Goto, E., Soma, T., Idesawa, M. and Sasaki, T.: Design of a Variable Shaped Beam System, 8th Int'l. Conf. Electron and Ion Beam Sci. and Technol. (1978).
- E16) Soma, T.: A Practical Focus-Deflection System for Shaped Electron Beams, *Optik* to appear.
- 電子相互作用関係
- B1) Boersch, H.: Experimentelle Bestimmung der Energieverteilung in thermisch ausgelösten Elektronenstrahlen, *Z. Phys.* 139, p. 115 (1954).
- B2) Zimmermann, B.: Broadened Energy Distribution in Electron Beam, *Adv. Electronics and Electron Phys.* 29, p. 251, Academic Press (1970).
- B3) Pfeiffer, H. C.: Experimental Investigation of Energy Broadening in Electron Optical Instruments, 11th EIL Beam Symp. (1971).
- B4) Pfeiffer, H. C.: Basic Limitation of Probe Forming Systems due to Electron-Electron Interaction, *Proc. 5th SEM Symp.* (1972).
- B5) Ichinokawa, T.: Effect of Electron Source to Energy Resolution in Electron Velocity Analysis-Interpretation of Boersch Effect, *JJAP*, 8, p. 137 (1969).
- B6) Ditchfield, R. W. and Whelan, M. J.: Energy Broadening of the Electron Beam in the Electron Microscope, *Optik*, 48, p. 163 (1977).
- B7) Sasaki, T.: A Computer Study of Electron-

- Electron Interaction in High Density Electron Beams, Conf. VLSI: Architecture, Design, and Fabrication, CALTECH, Pasadena 1979.
- Fly's Eye Lens 関係
- F1) Newberry, S. P., Klotz, T. H. Jr. and Buschmann, E. C.: Advances in Fly's Eye Electron Optics, Proc. Nat'l. Electronics Conf. 23, p. 76 (1967).
- F2) 後藤, 相馬, 小野: 超高精度陰極線管, テレビジョン学会誌, 26, p. 21 (1972).
- F3) Shibata, S., Soma, T., Goto, E. and Ono, A.: A New Type of Cathode Ray Tube Suitable for Bubble Chamber Film Measurements, Nucl. Instr. Methods, 123, p. 431 (1975).
- F4) Hughes, W. C., Lemmond, C. Q., Parks, H. G., Ellis, G. W., Possin, G. E. and Wilson, R. H.: BEAMOS-A New Electronic Digital Memory, AFIPS Conf. Proc. 44, p. 541 (1975).
- F5) Speliotis, D. E.: Bridging the Memory Access Gap, *ibid.*, p. 501 (1975).
- F6) Ono, A., Fukawa, M., Kichimi, H., Kodama, H., Murakami, T., Sugahara, R., Suzuki, A. and Takahashi, K.: An Automatic Film Scanner (KAMA) Utilizing a New Type CRT with Double Deflection Scheme, Nucl. Instr. Methods, 141, p. 193 (1977).
- F7) Parks, H. G.: Matrix Lens Electron Beam Recording Systems, J. Vac. Sci. Technol. 15(3), p. 1035 (1978).

(昭和54年1月10日受付)