電 子 ビ ー ム 露 光

宮 内 栄*・横 内 光 広*

(昭和44年4月14日受理)

IC Pettern Exposure by Electron Beam

Sakae MIYAUCHI and Mitsuhiro YOKOUCHI

(Japan Electoron Optics Labratory Co, Ltd, Mitake, Tokyo)

(Received Apr. 14, 1969)

はじめに

IC 製作技術に電子ビームを応用しようとする研究は、近年かなり活発に進められている。特に露光技術に電子ビームを使うことは、従来の光学的な露光技術の限界を比較的容易に越え得る新技術の開発として注目されている。電子ビームのスポット径は紫外線の波長以下に集束することが可能であり、エネルギー範囲、位置制御等が容易であることからその実用化が期待されていた。

IC 製作技術の急速な進歩と共に回路素子とそれらの連結配線は高密度化し高性能のものが開発されているが、電子ビーム露光技術を取り入れることによりさらに高度な性能と集積度が可能であろう。また、LSI の本格的な製造が急がれている時期において電子ビーム露光装置が活用されるならば、図形制御の容易さから、試作段階においては特に時間が短縮されるほかにも多くの利点がある。

ここでは、ようやく実用段階に入った電子ビーム露光装置で実際に IC 用図形を露光した例をあげてその方法について述べる。

1. マスクレス電子ビーム露光

現在フォトエッチング工程において図形露光にマスクを用いて感光剤に紫外線を照射し、照射部分が重合硬化するもの〔例えば negative type KPR (Kodak Photo Resist), KTFR (Kodak Thin Film Resist)等〕と照射部分が可溶性となるもの〔(Positive type AZ-1350 (shiPlay)等〕で、試料面上にパターンを作っているが、紫外線に替えて電子ビームで露光する場合にはマ

図 1 電子ビーム露光装置 (JEBX-2B型)

スクを用いず感光剤に直接露光することができる。つまり電子ビームを細く集束して図形に応じてデジタル走査し、露光すればマスクを使う必要がないのである。したがって紫外線照射時に発生する問題、試料面とマスクとの密着性、マスク接触による磨耗、紫外線の波長による回折現象等の影響に対する心配はなくなる。もちろんマスクを作る場合においても電子ビームを応用できるので、フォトマスク製作に必要な時間は極端に短縮される。また電子ビームを制御して露光すれば直接ウェーハに I.C を試作する段階において、図形が自由にしかも簡単に変更、修正することができるので、条件に応じて任意に改良していくことが可能で、マスクを使っている場合のようにア트워크からやり直す必要はない。くわえて計算機制御をおこなっているので最良の状態をデータテープしておくことで、生産ラインに使うためのフォトマスクを製作する時にそのまま使用することができる。マスクレス露光とマスクを製作するテクニックとは殆ん

* 日本電子株式会社三鷹製作所 第二事業班

ず、露光すべき図形はすべて計算機に記憶させておき、露光装置本体は計算機の指令を受けて露光開始から完了まで試料の位置設定と図形の露光を連続的に行なうものである。計算機には装置本体の制御部の走査器（ビームオン、オフと走査制御）や、試料ステージ移動（方向と距離制御）を動作させるためのプログラムを記憶させておき、このプログラムによって試料の露光位置設定を図3のように行ないながら図形をデータ順に露光する。普通図形を分解すると最も数の多いのが矩形である。一般に、露光する場合には、図4のように矩形を接合して任意の図形を形成することになる。台形（斜め線を含む）、円形等もそれぞれのプログラムによって可能である。計算機の記憶容量は4096語（16ビット）でこの内3000語を図形に使用すると矩形750個までを記憶させておくことができ、1000語を試料移動制御、自動図形重ね合わせ露光、その他これらに関連したプログラムで使用できる。矩形の場合走査器は計算機から1図形4点のデータ（ x_1, y_1, x_2, y_2 ）を受取るとビーム偏向とオン、オフの制御をさせ、ビームスポットは $0.5\mu\text{m}$ のピッチで図形の長手方向に走査しながら塗りつぶし図形データで与えた面積を終了する。すなわち露光すべき矩形の長手方向に約 $1\mu\text{m}$ 巾の線が引かれこの線を $0.5\mu\text{m}$ づつオーバーラップして指定された本数を繰返すことにより一図形が完了する。一度に露光できる最大の面積は $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ でこの範囲以上の図形を露光する必要がある場合は、試料ステージを移動して行なう。このようにビーム走査は通常 $0.5\mu\text{m}$ ピッチで最大 $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ まで行なうが、 $1/4$ $1/20$ の縮尺も可能である。

図形データは図4(A)に示すように矩形の場合は $x_1 y_1$ の一角の座標と $x_2 y_2$ の辺の長さをそれぞれ μm 単位で作成する。斜め線を含め台形の場合は図4(A)bに示されるように4点の座標 $x_a y_a, x_b y_b, x_c y_c, x_d y_d$ を与え、その図形の一辺はX軸かY軸かに平行にとる。しかし斜めの部分は多数の矩形に分割してしまうため図形によっては小さな凹凸になることがあるので精度を要する箇所はX軸かY軸かに平行な図形にすると良好な結果が得られる。図形データは図4(B)に示されるように露光しようとする順序で表にまとめて紙テープにパンチし、リーダーを経て計算機に記憶させる。計算機に記憶させたデータが間違っていないかどうかを確認するためには、モニターCRTに図形を出して調べる。また、本体のビーム観察窓からは試料面上の図形の約40倍の大きさで視ることができる。

図5は実際に電子ビームで露光した図形である。感光剤は市販のフォトレジスト（KPR、主成分はポリ桂皮酸ビニール）を使用した。この図形から見てもわかるよ

矩形……始点の座標と辺の長さ指定
台形……4点の座標指定
(A) 図形分解

図形番号	露光の順序	矩形	始点の位置				辺の長さ			
			x_1		y_1		x_2		x_2	
		台形	4点の座標							
			x_a	y_a	x_b	y_b	x_c	y_c	x_d	y_d
a	1		50		50		100		100	
b	2		50	150	150	150	250	200	300	200
c	3		200		250		150		50	
d	4		300		150		50		100	
e	5		250		100		100		50	

露光の順序に数表を作成し紙テープを作る
(B) 図形データ表

図4 露光図形データの作成

うに現在最も一般的に行なわれているマスクを用いた紫外線照射によるものよりも解像度、精度の点で良好な図形が得られている。これは主として次の理由からである。

1) 電子ビームの波長が短いため紫外線において問題となる回折現象の影響が無視できるほどに小さい。（紫外線の波長 $3000\text{\AA}$ ）

一般に電子ビームの波長は $\sqrt{150/V}\text{\AA}$ （ V ：加速電圧）となる。

2) 電子ビームの細いスポット（約 $0.5\mu\text{m}$ ）をデジタル制御するので複雑な図形でも解像度の高いものが容易に得られる。

図 5 (1) 0.7 μ m の線露光 (KPR)

図 5 (2) 電子ビームによる露光図形 (KPR)

フォトエッチング用として一般に使われているレジスト KPR, KTFR 等を露光するのに必要な電荷量は、加速電圧を 30kV としてレジスト膜厚を 3000Å とすると、 5×10^{-6} クーロン/cm² 以上であり、AZ-1350 の場合には前の二種類のレジストの 5 倍以上が必要であることが実験結果から得られている。

露光時の電子ビームエネルギーがシリコン結晶に損傷を与えるかどうかについては、加速電圧 30KV、電荷量 10^{-4} クーロン/cm² 以下の露光では試作したダイオードの諸特性からダイオードでは影響がないことを実証することができた。

1.3 図形重ね合わせ

IC ではその製造工程からわかるようにトランジスタを含む簡単な回路を作る場合においても 6 回以上の図形重ね合わせを行なうことになる。したがって合わせ精度がその回路の特性、歩留まり等に大きく影響してくることは言うまでもない。

電子ビームによる露光技術が光による解像度の限界をこえるものであっても高性能の IC を作るに十分実用的

であるためには、この図形を精度よく重ね合わせることが条件となる。マスクが無いパターンを重ね合わせすることは人間の視覚によっては不可能でありここでもちいた方法は逆に言えば感覚的な誤差は全く含まれないので安定して高精度を得ることができるのである。これは電子ビーム露光装置の最も重要な点となっている。図 7 (A) に示すようにすでに作られている図形に合せて次の図形を重ねて露光する場合には、電子ビームによる位置検出と補正を行なう。すなわち 1 次図形と同時に作られた位置検出用のマークを計算機の走査指令によりビームで走査して試料上の凹凸マークによる反射電子線から得られた位置信号を計算機に記憶させ、この位置信号の座標点にもとづいて次に露光する 2 次図形の座標を自動的に補正して、1 次図形に精度よく重ね合わせ露光する。位置検出用マークは各チップ毎に作られているので試料ステージを移動して次のチップを露光する場合にも同様に行なう。

一度でも試料を移動または着脱すれば必ずビーム原点と 1 次図形との相対関係は狂うが、位置検出精度は $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以内であるから周囲条件などによる制御系の誤差を見込んで重ね合わせ精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ が得られる。重ね合わせ図形を露光する場合に必要なマークは各チップ毎に 1 個ずつの位置検出マークの他に回転補正用マークとゲインチェック (図形の大きさ調整用) 用マークが必要である。これらはそれぞれ $0.3 \mu\text{m}$ 以上の凹凸がなければ位置信号を得るのに充分でない。マークの必要数は 1 枚の試料に最低 2 個であり、図 7 (B) に示すように両端に近い位置に作る。1 次図形露光の後現象、エッチング、拡散等の工程を経て次の図形を露光する場合に試料の設定を 1 次図形を露光した時と全く誤差のない状態に再現することは困難である。したがってこの状態を観察して回転方向の誤差があったならばそれを補正しなければならない。回転補正用のマークは試料の X 軸上 (または Y 軸上) の両端にあるから x 軸上 (または Y 軸上) のみ試料を移動して走査型電子顕微鏡と同じ方法でマークを観察し、モニタ CRT の画面で両端のマーク位置のずれがなくなるように回転調整ネジにより補正する。非常に回転の補正量が少ないと見られる場合には計算機を使用して自動補正も可能である。

1 次図形を露光してから 2 次露光するまでの間に周囲条件の変化があった場合とか日数が経った場合、電子ビームの走査距離を変動なく保持することは非常に困難で

(a) ウエーハ露光用試料ステージ (b) 乾板露光用試料ステージ

図 6 試料ステージ

(A) マーク検出と補正值決定法

図 8 図形の自動重ね合わせ露光

(B) 回転補正およびゲインチェックマーク

図 7 電子ビームによる位置検出と補正

図 9 モアレ縞による位置検出とビーム補正 (MBC)

あるが、これは1次図形と同時に作られたゲインチェック用マークを計算機の走査指令により検出して、表示値が規定値でなければその差を補正することで解決される。これらの準備は走査範囲全面にわたって図形の重ね合わせ精度 $\pm 1\mu\text{m}$ を得るために必要である。図 8 は自動図形重ね合わせの例である。図 6 (a) はウェーハ露光に使用するステージである。

1.3.1 図形位置検出方法

各チップ毎に作るマークの形状は四角形、L 形等あるが普通は L 形が多く用いられており、マーク図形の大きさは、 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 以内に入る程度のものである。マーク図形を走査する範囲は図形の長手方向に直交するように X 軸方向、Y 軸方向共 $50\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ をとっている、この図形位置検出用としての占有面積は $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の 1% 以下である。1 次図形と同時に作る場合のマークは酸化膜層の厚みだけの凹凸であるが、エッチングを酸化膜層だけにとどめずにシリコン層まで深め、同じマークの走査位置をその都度少しづつ移動して最後まで使う方法もある。

マークを電子ビームにより計算機からの指令で $0.5\mu\text{m}$ ピッチまたは縮尺している場合にはそれ以下で走査する。そして試料面からの反射電子線は凹凸によって、その反射方向および量が変化するため、固定して取付けて

ある検出器で検知して信号を計算機に戻すと、原点から何 μm 電子ビームが移動した時に信号があったかで、その位置を正確に読み取ることができる。しかし同じマークを最後まで使用するとき、試料の処理工程を繰返えすごとにこのマークのエッジも、サイドエッジ等で僅かづつ変化するので信号の位置もづれてくることになる。このようなづれを無視することはできないので、常に図形の中心点を求めることにすればよい。マーク図形のエッジの変化は普通、全体が同程度に起っているからマークの信号を両側から同じ条件で得るためにビームを往復走査し、信号 a と b を取り出しこの値から図形の中心をだす。また、マークとして作ってある図形から検出される信号 a と b との差は、マーク図形の中でありこれはほとんど一定であるから、この差に $\pm \alpha$ のリミットをつけておけばマーク信号以外の外部雑音による誤差は防ぐことができる。以上は図 7 (A) に示してある通りである。

多くの場合図形のエッジは化学処理するときにかかる粗さがあるので、走査する位置を少しづつ移動して複数回の信号値から平均を出すことで信頼度の高い補正值を得ることができる。このような方式により検出精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内となる。

図10 配列図形の接合露光，矢印の部分が接合箇所（フォトマスク用乾板）

2. MBC 方式による電子ビーム露光

最近開発された方法で MOIRE FRINGE AND BEAM CONTROL SYSTEM 略して MBC というのがある。これは図形相互間の位置精度をだすのに、試料ステージの移動距離を $1\mu\text{m}$ 単位で正確に測定して、指定距離に対する過不足を、ビーム偏向によって補正してから露光する方式である。

2.1 MBC 方式の構造と原理

図2の装置構成図にはこのシステムも含めて示してあるが詳細は図9に示してある。ステージの移動距離および移動方向を検出するには、ステージに取り付けた移動回折格子と固定の回折格子によって作られるモアレ干渉縞が、ステージの移動によってフォトダイオードが4個並んだ面を移動するので $1\mu\text{m}$ 毎に電気信号が得られる。これを方向弁別回路を経て可逆カウンタが計数することで位置が判別され、実際の移動距離の数値をカウンタから計算機に戻し、指定距離との差があればその差分だけ電子ビームを偏向補正する。これによって電子ビーム原

点と試料位置との相対関係は正確に指定距離および指定方向共補正されたことになる。

ステージを移動させるのはステッピングモータを2個使用し、X軸Y軸の方向に約 $1\mu\text{m}$ ステップで駆動している。

2.2 図形の接合

電子ビームの有効走査範囲が $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ であることは前に述べたが、これ以上の大型図形や同図形を配列して露光したい場合には、この MBC 方式が適している。別の面から見ればフォトマスクを作るにはこの方法がよいとも言える。例えば $2\text{mm}\times 2\text{mm}$ に配置された図形を等間隔で多数配列して $40\text{mm}\times 40\text{mm}$ の大型図形を作るレベータのような使い方もあるし LSI の如く各チップに跨って連続した図形で露光するには、この方法でビームと図形との相対位置を正確に移動および補正した後僅かダブルさせて露光すればよい。したがってステージ移動とは関係なく同図形でも異種図形でも連続して大きく図形を作ることができる。図10は MBC 方式で作ったフォトマスクの例である。マスクを作る場合には前にも述べたような

図11 電子ビーム露光により製作した組み合わせマスク

電子ビームによる位置検出マークを用意することが困難であり、実用向きでないから MBC方式が良い、マスクを組みにして使う場合でも図形相互間の再現性が良いから心配ない。図6(b)は乾板露光用ステージである。図11は電子ビーム露光で製作した1組のマスクである。

3. 電子ビーム露光の図形精度

以上述べたような方法で実際に露光された図形の精度はどうであるか、装置の設置状況やレジストの状態に影響されるのは勿論だが総括的には次の通りである。

3.1 最小露光巾

市販のフォトリソ resist (KPR) を使った場合次式が成立することが実験的に確かめられた。最小露光巾 $\sim$ 電子ビームスポット径+レジスト膜厚電子ビームスポット径はビーム電流値を減らせば小さくなるが、レジスト(KPR)を一定時間内で露光するのに必要な電子ビーム電流値をもたせても $0.5\mu\text{m}$ 以下にすることが可能で、膜厚を $0.3\mu\text{m}$ とした場合に露光線巾は $0.6\sim 0.7\mu\text{m}$ が限界である。そして平行線の最小中心間距離は $2\mu\text{m}$ であ

る。

3.2 図形精度

一般的には図形精度は $\pm 1\mu\text{m}$ であるが外部雑音や周囲温度の変化によって $2\mu\text{m}$ 位の誤差がでることがある。この誤差の内には再現性のあるものがあって、これはプログラムの修正で除去することができる。

4. 電子ビーム露光の特色

従来の光方式と比較して電子ビーム露光の長短を要約すれば次の通りである。

(1) 最少露光巾が小さい

現状では線巾 $0.6\mu\text{m}$ 、ピッチ $2\mu\text{m}$ であるがビーム用レジストの開発で $0.1\mu\text{m}$ までは達成できるであろう。

(2) 図形の精度が高い

電子ビームの焦点深度 $40\mu\text{m}$ という値から試料面の粗さに影響されないで $1\mu\text{m}$ の精度が得られる。

(3) 露光準備の時間が短い

アークワークやリダクションカメラの工程がテーブ

作成に替えられるので大巾な時間短縮ができる、普通の図形なら 2〜3時間でテープが作れる。

(4) 図形の変更が容易である

図形のチェックと変更が極めて容易であるから少しづつ異った図形を多数露光でき IC の試作に適する図形変更の所要時間は 1箇所 1分以内である。

(5) CAD (計算機による自動設計) と直結できる。計算機による設計で作ったデータはそのまま使えるので自動設計—自動露光と直結できる。

(6) 設定条件がゆるい

リダクションカメラやホトレピータの設置に比べ所要条件は安易で温度制御 1°Cを除き特殊な震動防止策は不要である。

(7) 電磁雑音に弱い

特に電源ラインから入る高周波ノイズは装置の誤動

作を起こすので、ラインフィルタ、シールド等の防護策を必要とする。

(8) 露光時間が長い

レピータに比較しても露光正味時間が長く、現状ではウェーハに直接露光するのは IC 試作として充分実用できるが生産ライン向きでない。

おわりに

これからの IC 製作技術の中に電子ビーム、イオンビームの新技术を導入することは不可欠である。現状においても国内、外、の各所で積極的にその研究が進められていることはまことに當を得ている。

我々は今後も改良を重ねて、より性能の高い安定した装置を提供すべく努力しておりますので各位の助言御指導をお願いする次第です。