

報告番号

※<sup>△</sup>第 3568 号

# 主論文の要旨

題名 電子ビーム露光の高速化  
のための基礎的研究

氏名 古川 泰男

# 主論文の要旨

報告番号

※ 第 <sup>2</sup> 号

号

氏名

古川 泰男

計算機や通信機を初めとする情報機器などの高性能化、高信頼化、低価格化を推進するため、半導体集積回路（IC）の高性能化、高機能化、大容量化への要求はますます強いものがある。このような要求を実現する基本的な方法は回路の微細化によるICの高集積化である。たとえば最先端のVLSIである4 Mbit DRAMでは、いまやその最小線幅は0.8~1  $\mu\text{m}$ となっている。このような回路の微細化は、Siウェハ上にパターンを形成する露光技術の進歩なくしては考えられない。

微細パターンを形成する露光技術の主流は紫外光によるマスクパターンの縮小転写である。一方、回折による光露光の解像力の限界を克服する方法として電子ビーム露光が活発に研究開発されてきた。そして、その実用化はまず、電子ビーム露光の高速性を活かしたマスクパターン描画においてなされた。これは従来の光を用いたパターンジェネレータに比較して10倍以上高速であるため、LSIのマスクパターン描画に不可欠となっている。さらに1  $\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを容易に描画できる高解像性あるいはパターンの設計変更の容易性といった特徴をも活かした直接露光の実用化が強く期待された。この直接露光はマスクを必要としないので、設計から試作までのターンアラウンド時間が大幅に短縮される利点がある。そこで先端LSIの試作開発などに適用されるようになったが、LSIの製造用としては生産性が第一であるため、10ウェハ/時間程度のスループットを可能にする高速露光が必須となる。

こうした背景のもとで、本研究は10ウェハ（4インチ $\phi$ ）/時間程度の高速の電子ビーム直接露光を実現するための基礎となる技術の開発を目的として行われた。電子ビーム直接露光の高速化を図るためには、露光装置、電子レジスト、

# 主論文の要旨

報告番号

※<sup>2</sup>第

号

氏名

古川 泰男

プロセス、データ転送（ソフトウェア）など、いくつかの面からの研究が必要となる。また露光装置自体にしても、電子光学系のみならず機構系、真空排気系、計算制御系など複雑で精度や性能の高い各要素を含んでいる。しかし高速露光を実現する上で最も基本的なものは、装置の心臓部である電子光学系において、高密度で大電流の電子ビームの発生とその高速偏向、および高速の位置合わせに関する技術であり、本研究の対象もこれらの点にある。

第一章は序論であり、IC製造における露光技術の役割と意義、ならびに電子ビーム露光の必要性について述べた。そして、その技術の発展を振り返りつつ、ウェハ上への直接露光の実用化のための高速露光が今後の電子ビーム露光技術の研究の流れであることを明らかにし、本研究の目的を明確にした。

第二章では電子ビーム露光の高速化について系統的な検討を行い、本論文における三つの研究課題を明らかにした。第一は可変矩形露光用の高密度（50 A/cm<sup>2</sup>）・大電流（4.5  $\mu$ A）の電子ビームを発生する長寿命の電子銃の研究である。第二は10 MHzという高い電子ビーム偏向周波数を実現するための電磁偏向器および偏向制御法に関する研究である。第三は位置合わせ時間が1秒以下、精度が $\pm 0.1 \mu$ m以下という高速・高精度の自動位置合わせ技術に関する研究である。

第三章では、電子間相互作用の影響を考慮して、所望の高密度・大電流の電子ビームを実現するための輝度とエミッタンスの条件を検討した。個々の電子の座標と速度の統計的性質の時間変化を扱うことにより、電子間相互作用による電子ビームのぼけやBoersch効果として知られるエネルギー幅の増大が議論できることを明らかにした。ドリフト空間において、電子間相互作用による電子の位置と

# 主論文の要旨

報告番号	※ <sup>乙</sup> 第	号	氏名	古川泰男
------	------------------	---	----	------

速度の分散の増大を表す式を導出した。これに基づき、電子間相互作用の影響をモンテカルロ法による数値計算により算定し、レンズの球面収差と色収差も考慮して、所望の電子ビームを実現するために必要となる輝度として $3.2 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>·sr, エミッタンスとして $30 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ の値を明確にした。

第四章では、第二、第三章で明らかにした特性の電子ビームを発生する長寿命の電子銃について論じた。走査型電子顕微鏡用としてこれまで利用されているWヘアピン熱電子銃や電界放出型電子銃などの問題点を指摘した。これを克服するために仕事関数が小さく、融点の高い材料であるLaB<sub>6</sub>を陰極とした熱電子銃に着目し研究を行った。まず単結晶と焼結体LaB<sub>6</sub>を比較し、電子ビーム電流の安定性の点で単結晶LaB<sub>6</sub>陰極が優れていることを明らかにした。

単結晶LaB<sub>6</sub>陰極の結晶方位、陰極先端形状、電子銃構造、加熱温度などと、電子ビーム特性の関係を詳細に検討した。 $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ などの軸方位の陰極の電子放出特性を比較検討し、LaB<sub>6</sub>結晶の(100)面が最も強い電子ビーム放出を与え、しかも(100)面が頂点にくる $\langle 100 \rangle$ 軸方位陰極が結晶異方性の影響の少ない一様性の良い電子ビームを与えることを明らかにした。したがって、目的とする可変矩形露光用の電子ビームの発生には陰極の軸方位として $\langle 100 \rangle$ 方位を選択することが最適であることを示した。さらに、陰極の先端曲率半径を $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、陰極設定高さを $0.4 \text{ mm}$ 、動作温度を $1550^\circ\text{C}$ とすることにより、加速電圧 $20 \text{ kV}$ で必要な輝度 $3.2 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>·sr, エミッタンス $30 \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ を $1000$ 時間以上になんら維持することができることを明らかにした。

第五章では、高速化のための第二の課題であるパターンを高速に描画するため

# 主論文の要旨

報告番号

※<sup>2</sup>第

号

氏名

古川 泰男

の電子ビームの偏向制御について論じた。汚染が少なく安定な電磁偏向器の高速化を中心課題として研究を行った。これまで電磁偏向器の高速化については系統的な研究がないため、 $1\mu\text{m}$ の線幅を $10\text{MHz}$ の露光周波数で描画するために必要となる偏向磁界の周波数特性を明確にした。電磁偏向器の高速化を図るために、偏向コイルのインダクタンスを低減し、広帯域化を図った。さらに偏向速度を実質的に制限する渦電流の効果を発生磁界の周波数特性によって検討した。偏向器のスクリーニングチューブの内壁を $0.1\mu\text{m}$ 以下のAl薄膜とすることにより、十分広帯域な偏向磁界特性を示す電磁偏向器を実現した。さらに高速DAC回路とスキャン回路とを主要部とする高速駆動回路を試作し、 $10\text{MHz}$ のデジタル偏向を実現した。またDACの整定のための無駄時間の短縮を図るため、複雑なパターンの描画に好適なパターンパッケージ法を考案した。これらの成果を描画によって実際に確認した。

第六章では、第三の課題である自動位置合わせについて論じた。自動位置合わせのためにはチップ上のマークを高速・高精度に検出することが必要であり、その鍵は反射電子の検出器の開発にある。従来、反射電子検出器として半導体素子が知られていた。しかし基本データが乏しいうえ、検出面積と応答速度との間に相反性があるため反射電子の捕獲率が低く、マーク検出時間の短縮を図るうえで問題となっていた。広面積化により電子の捕獲効率をあげても応答速度の低下のない反射電子検出器として、高速のプラスチックシンチレータを透明導光板に塗布したものを考案した。検出面積 $40\times 40\text{mm}^2$ で厚さ $1.5\text{mm}$ の広面積で薄型の検出器を開発し、その諸特性を明らかにした。この検出器を用いたマーク検出系を試作し、マーク検出の再現性の精度の標準偏差として $0.008\mu\text{m}$ という

# 主論文の要旨

報告番号	※ <sup>△</sup> 第	号	氏名	古川 泰男
------	------------------	---	----	-------

高い精度を得た。さらに、電子ビーム偏向領域（フィールド）の誤差を補正するためのハードウェアとアルゴリズムを開発した。1 mm<sup>2</sup>のフィールドにおいて ±0.1 μm (2σ) の高い位置合わせ精度が0.3秒以下で得られ、直接露光用として十分な精度と高速性が実現された。

以上の結果、本研究が目的とした電子ビーム露光の高速化のための基礎技術の開発がなされ、直接露光実用化のめどである10ウェハ（4インチφ）／時間の描画スループットの見通しが得られた。

ASIC (Application Specific IC) の需要の急速な増大の中で、設計・試作・改良のターンアラウンド時間を短縮できる電子ビーム露光への期待はますます高くなっている。そのため、一層の高速化や微細化を主たる目標として、電子ビーム露光の研究は引き続き活発に推進されている。高速化のために、電子ビームの電流密度、電子ビームの偏向速度、レジスト感度などの向上がなお追求されている。一方、電子の散乱によるぼけを低減し微細化を図るために、50 keV以上の高エネルギー電子ビームによる露光技術が研究されている。こうした研究開発により電子ビーム露光技術はさらに進歩し、LSIの開発や製造に果たすその役割はますます大きくなるものと予想される。