EB 描画技術の展望*

奥貫昌彦**

Future Prospects of Electron Beam Lithography Technology / Masahiko OKUNUKI

Key words: electron beam lithography, electron projection, multiple beam, ML2

1. はじめに

電子ビーム(EB)描画技術は、1960年代に走査型電子顕微鏡の応用技術の1つとして誕生して以来、解像性能が優れていることから、今日まで先端デバイス開発における重要な微細加工手段とし発展してきた。

近年、半導体露光技術の分野では、生産性の高い露光技術として光を用いた露光技術が使われてきた。しかし、2005年の65nm世代以降の露光技術では、現在使われているKrF(248nm)、ArF(193nm)レーザーの露光波長からさらに短波長化した技術が要求され、F2(157nm)、EUV(13nm)を光源とする露光技術が必要とされている。しかし、これらの新規要素技術の難度が非常に高いことから、生産性の高いEB描画技術が見直され、次世代の露光技術(Next Generation Lithography : NGL)の1つとして注目されている。

EB描画の方法は、当初、ポイントビームを走査する方式であったが、その後、生産性を高める研究が進められ、矩形ビームを用いて描画する可変成形方式、さらに、回路パターンの繰り返し図形の一部をマスクとし、これを転写する部分一括方式へと発展してきた。しかし、今日の半導体デバイスの生産に適用するためには、さらに高い生産性を備えたEB描画技術が必要とされる。この要求に応えるために、1990年以降2000年にかけて新たな高速EB描画方式に関する研究が盛んになった。その結果、電子線用のマスクを用いたマスク転写技術や、マルチ電子ビームを用いたマスクレスEB描画技術(ML2 : Mask-less

Lithography)の分野で多くの描画方式が報告されている。後者のML2技術は、マスクを使わずに直接ウエハに描画する高速マスクレス描画方式であることから、QTAT(Quick Turn Around Time)が要求される中少量生産のSoC(System on Chip)デバイスの描画技術として期待されている。

EB描画技術の応用は、現在、半導体以外のマイクロマシン、光集積デバイス、高密度光ディスクや単原子デバイス等、広くナノテクノロジーの分野においても重要な技術となっている。

ここでは、将来が期待される高速EB描画技術の動向と展望について触れる。

2. EB描画技術の特長

EB描画装置で求められる性能は、光露光装置と同様、解像性能、パターン精度、生産性、安定性等であるが、ここでは、解像度と生産性について考える。光露光の解像力Rは

$$R = k_1 \cdot \lambda / NA \quad (1)$$

(k_1 : レジストプロセスで決まる定数, λ : 波長, NA : 投影レンズの開口数)

で決められる。

ここで、電子線の波長は、運動量p、プランク定数hとすると

$$\lambda = h/p \quad (2)$$

$$= 12.26/(V^*)^{0.5} \quad (3)$$

であり、 V^* は相対論電位で、電子線の電位V(Volt)とすると、

$$V^* = V (1 + 0.9785 \times 10^{-6}V) \quad (4)$$

となる。

現在提案されているEB描画方式では、1keVから100keVの広いエネルギー範囲の方式が提案されていて、例えば、1keVの電子線の波長は、 $3.87 \times 10^{-2} \text{nm}$ 、50keVでは、 $5.36 \times 10^{-3} \text{nm}$ であり、光露光の短波長とされるF2(157nm)、EUV(13nm)と較べても、3桁以上短い波長となる。したがって、電子光学系でよく使われる $NA \sim 10^{-3}$ のように小さな値でも(1)式の関係から、解像度は、電子線の波長(エネルギー)にはよらないことがわかる。しかし、

* 原稿受付 平成15年12月1日

** キヤノン(株)製品技術研究所(宇都宮市清原工業団地23-10)

奥貫昌彦

1971年、学習院大学物理学修士課程修了。同年、日本電子(株)に入社。現在、キヤノン(株)製品技術研究所室長、電子ビーム技術に従事。

電子ビームは荷電粒子であり、ビーム電流を大きく取ると空間電荷相互作用により、収束電子ビームの軌道が曲げられる。これはクーロン効果の1つの現象とされており、生産性の高いEB描画方式を実現するためには、この効果を軽減する方法が必要となる。

2.1 解像度と生産性について

EB描画方式のビーム収束性能 δ は、波長による影響が無視できることから、電子光学系のレンズ収差による広がり δ_a とクーロン効果による広がり δ_c で表すことができる。

$$\delta = (\delta_a^2 + \delta_c^2)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 δ_a と δ_c は、電子ビームの入射半角 α （ここで、 $\alpha \equiv \text{NA}$ ）、描画領域SFを共通の変数とし、また、 δ_c は、電子ビームの照射電流I、電位（加速電圧）V、カラム長Lと倍率Mを変数としている。

$$\delta_a = \delta_a(\alpha, \text{SF}) \quad (6)$$

$$\delta_c = \delta_c(\alpha, \text{SF}, I, V, L, M) \quad (7)$$

EB描画方式の高速化を実現するためには、この(6)、(7)の関係から、最大の照射電流Iで最小の δ となる条件設定が重要となる。

ここで、 δ_a の主な成分は、球面収差(Cs)、コマ収差(Sc)、像面湾曲収差(Sfc)、非点収差(Sas)があり、

$$\delta_a^2 \sim (\text{Cs}\alpha^2)^2 + (\text{Sca}\alpha^2\text{SF})^2 + (\text{Sfc}\alpha\text{SF}^2)^2 + (\text{Sas}\alpha\text{SF}^2)^2 \quad (8)$$

で表せる。また、クーロン効果に関するビーム軌道の広がりについては多くの研究¹⁾がある。その一例として、EPL方式²⁾の δ_c は、

$$\delta_c \sim (I^{0.83} L^{1.26} M) / (\alpha^{0.6} \text{SF}^{0.55} V^{1.54}) \quad (9)$$

で表せる。

一方、EB描画方式の生産性能を決める描画時間Tは、ウエハの面積W、レジスト感度S、ショット数 $N = W/\text{SF}$ 、ビーム整定時間Tsとすると、

$$T \sim WS/I + NTs \quad (10)$$

上記(8)、(9)、(10)式の関係で解像度と生産性(描画時間)

図1 EB描画の解像度と描画時間

は成り立っている。照射電流を増大して描画時間を短縮するためには、電子光学系の収差を改善して収束半角 α と描画領域SFを大きくし、逆に、光路長、倍率を小さく設定することが望ましい。また、レジスト感度と加速電圧の設定値も描画時間と解像度に関するパラメータとなっており、これらの関係を図1に示す。

このように、高速EB描画方式を実現するためには、新しい発想の方式提案が必要とされる。次に、そのいくつかの方式について紹介する。

3. 高速EB描画方式分類

高速EB描画を実現するための多くの方式が提案されており、ここでは、それらの方式を電子ビームとカラムの特長に分けて整理した(表1)。

EB描画技術で用いられる電子源は、従来、輝度が高く安定な電子源として単結晶LaB6の熱電子源とW(Zr)の熱電界放出型電子源(TFE)が用いられてきた。しかし、新た

表1 EB描画方式の分類

電子ビームの種類		マスク転写	マスクレス描画 (ML2)	
		単一カラム	単一カラム	マルチカラム
単一光源	単一ビーム	縮小転写方式 (SCALPEL, PREVAIL)	ポイントビーム方式	マルチカラムセル方式
			可変成形方式	
	分割マルチビーム	等倍転写方式 (EBP, LEEPL)	部分一括方式	DiVa方式
			低加速CP-EBDW方式	
マルチ面光源	光・電子変換	光・電子変換型 マルチカソード方式 (MAPPER)	BAA方式	マルチビーム・マルチカラム方式
	マルチカソード (微小電子源)		CIA方式	
			光電子・マルチビーム方式	
			MPI方式	

な高速 EB 描画方式では、電子源の種類も見直されている。特に、熱電子源は広い描画領域を一樣に照射するための電子源として見直されている。また、FPD (Flat Panel Display) 技術で、1990 年代に発展した FEA (Field Emission Array) を始めとする冷陰極タイプの微小電子源や光电変換素子を採用した方式の提案もある。また、電子光学系においては、従来の単一カラムでクーロン効果を低減する提案や、小型のカラムを複数配列してクーロン効果の影響を分散する方式も多く提案されている。

この表の中で、単一ビーム、単一カラムの組み合わせのポイントビーム方式、可変成形方式と部分一括方式は、すでに、実用機として多くの実績を残してきた方式である。そして、さらに生産性の高い高速 EB 描画技術を実現するためには、より多くのビーム電流が投入できるマスク転写やマルチ電子ビーム方式の ML2 の研究開発が必須である。

4. 高速 EB 描画方式の研究動向

4.1 EB マスク転写方式について

EB マスク転写方式には、電子ビーム用のマスクを縮小転写する EPL (Electron Projection Lithography) と X 線露光装置と同様に等倍マスクを用いて等倍転写する 2 つの転写方式が提案され、研究開発が進められている。

4.1.1 縮小転写方式

EPL 方式のマスクの縮小率は、1/4 で、100keV の電子線が透過する 100nm 前後の薄いマスク (散乱マスク) を用いた SCALPEL 方式³⁾と透過型のステンシルマスクを用いた PREVAIL 方式⁴⁾の 2 つがある。これらは共に、1mm 角のマスクパターンをウエハに投影して、250 μ m 角のサイズのパターンを形成する。EPL 方式の光学系の原理を図 2 (1) に示す SCALPEL 方式は、1mm 角のビームをマスク上に連続的に走査することで 250 μ m $\times$ 3mm の領域を描画する。一方、PREVAIL 方式は、投影レンズの偏向光学系を工夫して、250 μ m 角の領域をステップ状に走査して 5mm 幅と広い領域の偏向を実現している。いずれの方式も光露光のように一度にマスクを転写することが難しいため、ウエハとマスクステージを走査して回路パターンを全面に露光するが、この 250 μ m 角のパターンを精度よく繋ぐ技術が要求される。

描画領域の 250 μ m 角は、従来の可変成形方式や部分一括方式の 5 μ m 角に較べて 2500 倍も広いため、(9)式のクーロン効果による電子ビームの広がりを大幅に低減できる。したがって、電子ビームの照射電流 15 μ A、NA5mrad、レジスト感度 5 μ C/cm² の条件の時、80nm 以下の解像度で時間あたり 30 枚 (200mm ウエハ) の生産性能が期待されている⁴⁾。

4.1.2 等倍転写方式

等倍マスクを用いた EB 転写技術は、1980 年代に EBP (Electron Beam Proximity Printing) 方式として研究開発⁵⁾が行われた。この方式の特長を活かして電子ビームのエネルギーを 20keV から 2keV にした方式が、LEEPL (Low

図2 EB マスク転写方式の原理図

Energy Electron Beam Proximity Projection Lithography) として提案⁶⁾され、開発が進められている⁷⁾。この LEEPL 方式の原理を図 2 (2) に示す。この方式は、1mm² 程度の電子ビームを走査してマスク全面を照射して、ウエハ上に転写する近接露光であることから、クーロン効果の影響は少なく、照射電流が大きく取れる。また、電子ビームのエネルギーが 2keV と低いことから、レジスト感度の向上、近接効果の低減、さらに、電子ビームの吸収が大きいためマスクに特殊な吸収体が不要になることから、EPL 方式に較べてマスク構造が簡素化できるとしている。この方式の重要な要素技術は等倍のステンシルマスク技術であり、X 線露光や EPL のマスク技術との共通点を活かして、プロセス技術、マスク材料技術、検査・修正技術、レジスト技術等、総合的に研究開発が進められている。

4.1.3 低加速 CP-EBDW 方式

クーロン効果は電子ビームがクロスオーバを形成する際に大きく発生する。このことから、従来使われてきた軸対称型の磁界型レンズとは異なる多極型静電レンズによる非対称型の電子光学系を備えた低加速 CP-EBDW (Character Projection Electron Beam Direct Writing) 方式が提案⁸⁾されている。この光学系では、クロスオーバを一点に形成しないことで、従来型の電子光学系に較べて、クーロン効果の影響を約 1/10 以下にできるとしている。そして、電子ビームのエネルギーを 5keV と低エネルギーにすることで、レジスト感度が向上し、近接効果の低減を期待している。さらに、静電レンズと偏向器の制御電圧を低電圧にすることで制御性が高められる。

この方式では、全ての回路パターンを共通のセルマスク群で表現することを考えており、これが実現すればデバイス専用のマスクを準備する必要がなくなり、実質上の ML2 が実現できるとしている。

4.2 ML2 方式について

マスクレスの EB 描画方式でクーロン効果を低減して生

産性を向上する方法として、1つの電子光学系の中にマルチビームを形成する方式と電子光学系を配列したマルチカラム方式とがある。

4.2.1 単一カラムマルチ EB 方式

4.2.1.1 CLA 方式

単一光源から放射した電子ビームを複数に分割してマルチビームを形成し、このビームをブランキングする BAA (Beam Blanking Aperture Array) 方式⁹⁾があるが、この方式をさらに発展させた方式として、収差補正のための補正機構を電子光学系に導入することで、描画領域を拡大して高い生産性を得る CLA (Correction Lens Array) 方式¹⁰⁾が提案されている。この原理を図3に示す。この方式は、縮小投影光学系の収差である像面湾曲と歪曲収差を補正することで全系の収差量を低減し、広い描画領域を得ようとするものである。ここでは、縮小投影光学系の収差の影響をレンズ物面側の2次光源像の上でレンズの収差分を歪ませることにより補正する。CLAは、マルチのアパーチャ、レンズアレー、偏向器アレーとブランカーアレーで構成されている。レンズアレーは、縮小投影光学系の像面湾曲収差の補正に使われ、偏向器アレーは、歪曲収差の補正に使われる。また、この方式は、マルチビームの偏向を独立に制御するのではなく、共通の偏向器を用いて行うことから、マルチビームの偏向制御の複雑さが解消できる方式と言える。

この収差補正方式を用いることで、加速電圧 50kV、縮小投影光学系倍率 1/50、描画領域 250 μ m 角、偏向幅 4mm、NA10mrad、ビーム数 4096 本の系に対して、照射電流 4.8 μ A を取って、70nm 以下の解像度が得られると試算している。

4.2.1.2 光電子を用いたマルチ EB 方式

レーザービームを用いたマルチ描画方式は、既に実用化されているが、この技術を電子源の発生手段に応用したのが、この方式¹¹⁾の特長である。32本のレーザービームをホトカソード面に照射して光電子を発生させ、これを 50kV に加速してマルチ電子ビームを形成している。電子

図3 CLA方式の電子光学系の原理図¹⁰⁾

図4 マイクロカラム方式の概念図¹²⁾

光学系は従来の方式を用いることができるが、ホトカソードの安定化と寿命が重要課題であるとして、研究開発が進められている。

4.2.2 マルチカラム方式について

4.2.2.1 マイクロカラム方式

STM (Scanning Tunnel Microscope) 技術と MEMS 技術を用いて製作したマイクロカラムをウエハ上にチップ間隔で配列して EB 描画の生産性を向上させるマイクロカラム方式¹²⁾が提案された。この方式の概念図を図4に示す。この EB 光源の電圧は 1kV とし、また、レンズにシリコンを電極とした静電レンズを用いることでカラムの小型化を実現している。この方式のビーム形状は、シンプルなポイントビーム方式を採用している。現在、電子源として高輝度で安定な TFE を用いて、1カラムのサイズが 20mm × 20mm のものを試作し、これを 2 × 2 に配列してマルチカラムの性能がテストされている。この方式では、マルチカラムを高精度制御する技術と安定化する技術が重要な技術となるであろう。

4.2.2.2 マルチカラムセル方式と DiVa 方式

前記マイクロカラムのポイントビームに対して、矩形ビームが形成できる小型のカラムを配列する DiVa¹⁴⁾ (Distributed Multiple Variable Shaped Electron Beam) 方式とマルチカラムセル (MCC) 方式¹⁵⁾が提案され、その研究成果が報告されている。前者の DiVa 方式は、静電レンズを用いた可変成形方式の光学系を並列に配列してマルチカラムを実現している。一方、後者の MCC 方式では、磁界型のレンズの磁極に複数の開口を開けた新しいタイプの LRL (Lotus Root Lens) と言われるレンズを提案している。LRL の構成を図5に示す。MCC 方式の電子光学系は、この LRL タイプのレンズを組み合わせ、加速電圧 50kV の

(1) 従来の単一磁界レンズ (2) MCC方式の4×4配列のLRL

図5 LRL (Lotus Root Lens) の構成図¹⁵⁾

部分一括方式の光学系をチップ間隔に配列する構想であり、すでに、 $\Phi 10\text{mm}$ のレンズ開口を 22mm 間隔で 4×4 に配列した LRL を試作し、収束性能が調べられている。

4.2.2.3 その他のマルチビーム方式

微小電子源の研究は、FPD (Flat Panel Display) の応用を中心に多くのタイプの電子源、および、材料に関する研究開発が進められてきたが、近年、それらの微小電子源を高速 EB 描画の方式に用いた例が報告されている。

2 次元に配列した MIM (Metal Insulator Metal) 電子源に描画パターンに相当する電子を放出させ、その電子ビーム像を縮小投影する MPI (Matrix Pattern Imaging) 方式¹⁶⁾や、FEA (Field Emission Array) の微小電子源を用いて、カラム当たり 32 本のビームを形成し、その 1 本のカラムサイズを 20mm 角程度にしてウエハ上に最大 201 本を配列する MM (Multi Beam Multi Column) 方式¹⁷⁾が提案されている (図 6)。

その他にも、光ビームでマルチ電子源のエミッションを誘起することで安定な 2 次元のマルチ電子ビームを発生して近接描画する MAPPER¹⁸⁾ 方式が提案されている。

5. ま と め

ここでは、特に高速 EB 描画技術の特長と方式について紹介してきた。高速 EB 描画技術の微細化の限界が、光技術と異なり、波長によらずにクーロン効果に依存するということは、描画方式の工夫と技術開発努力で解像度と生産性の問題を改善していけることを意味している。今回、ここで示した EB 転写の基本方式は、すでに 20 年以上前に提案されていた方式であるが、今日の先端の電子光学設計技術、制御技術、マスクにおける材料・プロセス技術を付加することで、新たな縮小転写方式や等倍転写方式として再構築されている。一方、ML2 方式は、新たな電子源や

電子光学系を用いたマルチ描画方式の提案に対して、微細加工技術、材料技術、それに先端の制御技術を適用することで、着実に発展する方式であると考えている。

EB 描画技術が高速化することで、電子ビームの位置の安定化や繋ぎ精度に要求される条件はさらに厳しいものになるが、これも、高精度の位置制御技術、電子ビームの安定化技術の積み重ねにより、描画方式と同様、克服できるものと考えている。

これらの高速 EB 描画技術が、21 世紀の新たな微細加工技術として、半導体だけでなく、広くナノテク技術の分野の微細加工技術として発展していくことを期待する。

参 考 文 献

- 1) G.H.Jansen: Trajectory displacement effect in particle projection lithography systems: Modification to the extended two-particle theory and Monte Carlo simulation technique, J. Appl. Phys., **84** (1998) 4549.
- 2) W.Stickel: Simulation of Coulomb interactions in electron beam lithography systems-A comparison of theoretical models, J. Vac. Sci. Technol., **B16** (1998) 3211.
- 3) S.D.Berger, et al.: New approach to projection electron lithography with demonstrated $0.1\mu\text{m}$ linewidth, Appl. Phys. Lett., **57** (1990) 153.
- 4) H.C.Pfeiffer, et al.: Projection reduction exposure with variable axis immersion lenses: Next generation lithography, J. Vac. Sci. Technol., **B17** (1999) 2840.
- 5) H.Bohlen, et al.: High throughput submicron lithography with electron beam proximity printing, Solid State Technol., Sept. (1984) 210.
- 6) T.Utsumi: Low energy electron beam proximity projection lithography: Discovery missing link, J. Vac. Sci. Technol., **B17**(1999) 2897.
- 7) A.Endo, et al.: Completion of the β tool and the recent progress of low energy EBeam proximity projection lithography, J. Vac. Sci. Technol., **B21** (2003) 311.
- 8) Y.Yamazaki, et al.: Electron optics using multipole lenses for a low energy electron beam direct writing system, J. Vac. Sci. Technol., **B20** (2002) 25.
- 9) H.Yasuda, et al.: Multielectron beam blanking aperture array system SYNAPSE-2000, J. Vac. Sci. Technol., **B14** (1996) 3813.
- 10) M.Muraki, et al.: New concept for high throughput multielectron beam direct write system, J. Vac. Sci. Technol., **B18** (2000) 3061.
- 11) S.T.Coyle, et al.: Prototype raster multibeam lithography tool, J. Vac. Sci. Technol., **B20** (2002) 2657.
- 12) T.H.Chang, et al.: Electron-beam microcolumns for lithography and related applications, J. Vac. Sci. Technol., **B14** (1996) 3774.
- 13) L.P.Murray, et al.: Advances in Arrayed microcolumn lithography, J. Vac. Sci. Technol., **B18** (2000) 3099.
- 14) T.R.Groves, et al.: Distributed, multiple variable shaped electron beam column for high throughput maskless lithography, J. Vac. Sci. Technol., **B16** (1998) 3168.
- 15) T.Haraguchi, et al.: Development of electromagnetic lenses for multielectron beam lithography system, J. Vac. Sci. Technol., **B20** (2002) 2726.
- 16) S.Tanimoto, et al.: Preparatory Study for the Matrix-Pattern Imaging EB system, J. Appl. Phys., **42**, Part1, No.10 (2003) 6672.
- 17) E.Yin, et al.: Electron optical for a multicolumn multibeam direct-write electron beam lithography system, J. Vac. Sci. Technol., **B18** (2000) 3126.
- 18) P.Kruit: High throughput electron lithography with the multiple aperture pixel by pixel enhancement of resolution concept, J. Vac. Sci. Technol., **B16** (1998) 3177.

図 6 マルチビーム・マルチカラム方式の概念図¹⁷⁾