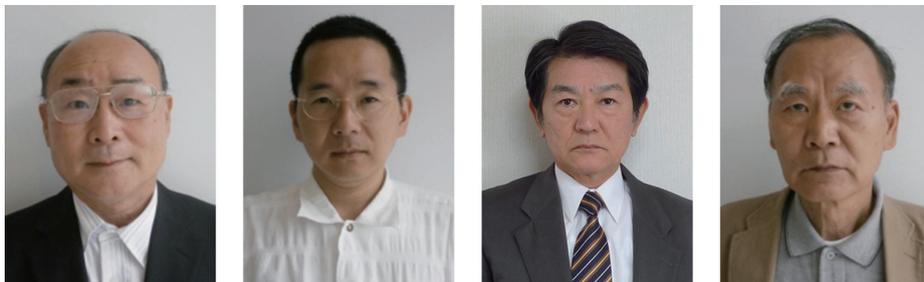
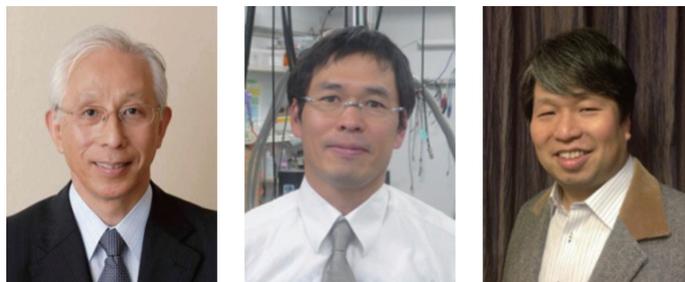


電子線直接描画の高スループット化実現のための多軸・多ビーム化技術

株式会社 PARAM 安田 洋, 原口 岳士, 矢原 秀文, 高畑 公二
名城大学 理工学部電気電子工学科 下山 宏, 六田 英治, 村田 英一
微細加工プラットフォーム「東京大学超微細リソグラフィ・ナノ計測拠点」東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC)^a, 東京大学 大学院工学系研究科^b 久保田 雅則^b, 三田 吉郎^b, 浅田 邦博^a



(左から) 株式会社 PARAM 安田 洋, 原口 岳士, 矢原 秀文, 高畑 公二



(左から) 名城大学 理工学部電気電子工学科 下山 宏, 六田 英治, 村田 英一



(左から) 東京大学 大学院工学系研究科 久保田 雅則, 三田 吉郎, 東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) 浅田 邦博

半導体集積回路 (IC, VLSI) 素子は、基板であるウエーハに機能性の薄膜を成膜し、その上にデザインパターンを描画して、エッチング加工によって薄膜に転写する微細加工手順を繰り返すことによって作製される。このうち、パターンの描画を「リソグラフィ」と呼び、ガラス乾板 (フォトマスク) 上にパターンをあらかじめ描画し

ておき、それを光によって一括して露光する「光リソグラフィ」が量産技術として用いられている。「レチクル」といよばれる一つの設計まとまりを、シリコン基板に縮小投影露光し、精密ステージによってウエーハを移動して露光という作業を繰り返す「ステッパー」技術によって、1枚のウエーハ上にレチクルのコピーを多数生産して

いる(図1)。半導体の特性寸法が微細化するに従って(図2)、マスクの価格が上昇し、製造コストのかなりの部分を占めるようになってきている。高価になったマスク代でペイするためには、大量のLSIチップを作製して売りさばく必要があり、この「大量生産しなければ生き残れない仕組み」が半導体製造会社の経営に対して大きな課題となっている。

フォトマスクを用いずに微細パターンを描画する方法は直接描画とよばれ、中でも電子線ビームを用いるものを電子線直接描画、または電子線リソグラフィ(E-Beam lithography)と呼ばれる。電子線リソグラフィによれば、微細パターンを直接比較的容易に得られるので、マスク

コストの削減と、マスク作製の準備待ち時間をゼロにすることができるが、一枚一枚の描画に時間がかかることが難点とされていた(図3)。本研究は、1時間あたりのウエーハ処理枚数を10枚(10wph)に高める技術を開発することによって、電子線直接描画による集積回路のパターニングを実用化に導くことを目指した研究である。ナノテクノロジープラットフォーム東京大学拠点の装置を、同拠点の教職員の指導を受けて利用することで、いくつかの技術的なブレイクスルーを得ることができ、それらを含む研究成果を学会誌に投稿、掲載に至っている。本稿では筆者らが発表した学会論文[1]を元に研究紹介を行なう。

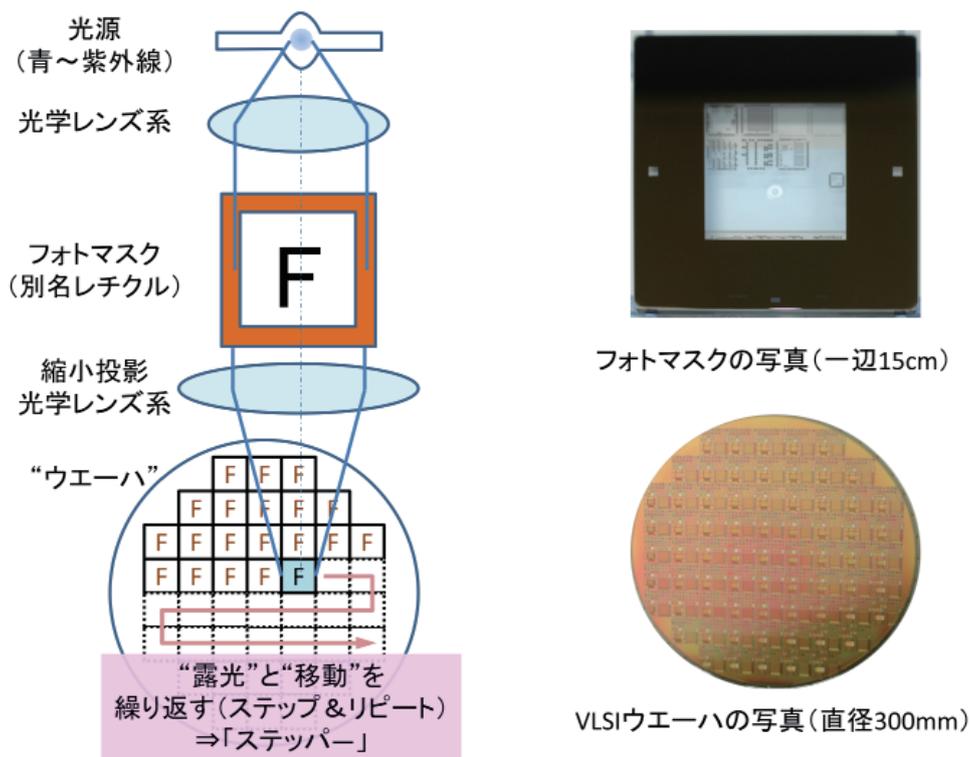


図1 ステッパー装置による半導体露光の概念図

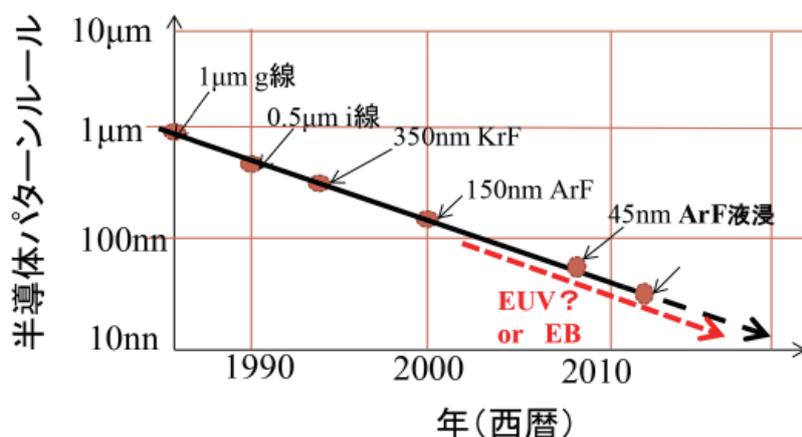
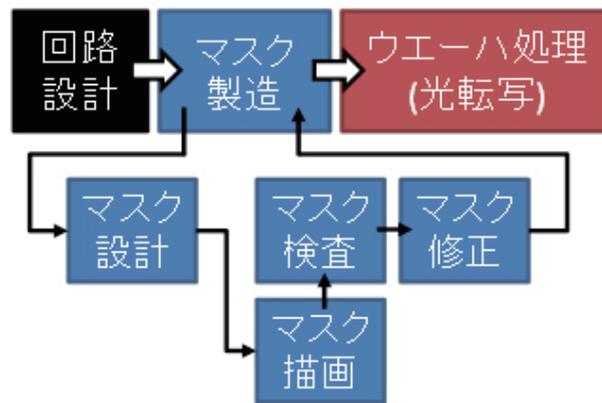


図2 半導体用露光技術の推移

【光転写工程】



【電子線直接描画工程】



図3 ステッパーによる光転写工程と電子線描画工程の比較. ステッパーによる工程と比較し, 電子線直接描画はマスクを必要としない分コスト削減・マスク作製時間待ちの大幅な短縮が可能である. その一方でウエーハ処理に時間がかかることが難点であった.



1. 電子線直接描画の高速化に関する課題

電子線直接描画は, 真空容器の中で電子を引き出して, 高い電圧によって加速し, 電磁レンズによってウエーハ面に集束照射することで, ウエーハにあらかじめ塗布しておいた有機物の薄膜 (レジストと呼ばれる) に化学反応を起こすことでパターンを描画する技術である (図4). レジストに化学反応を起こすに十分な量のエネルギーを投入するためには式 (1),

$$(\text{単位面積あたりの投入エネルギー } U [\text{J}/\text{m}^2: \text{ジュール毎平米}]) = (\text{加速電圧 } V [\text{V}: \text{ボルト}]) \times (\text{単位面積あたりの投入電荷量 } Q [\text{C}/\text{m}^2: \text{クーロン毎平米}]) \quad (1)$$

に従って, 単位面積あたりの投入電荷量 (ドーズ) を制御すればよい (脚注:ただし, 投入したエネルギーのうち, 実際に化学変化に使われる量はその一部である. 効率は加速電圧にも依存しており, 厳密な解析が必要である.). ここで,

$$(\text{単位面積あたりの投入電荷量 } Q [\text{C}/\text{m}^2]) = (\text{電流密度 } J [\text{A}/\text{m}^2: \text{アンペア毎平米}]) \times (\text{照射時間 } t [\text{s}: \text{秒}]) \quad (2)$$

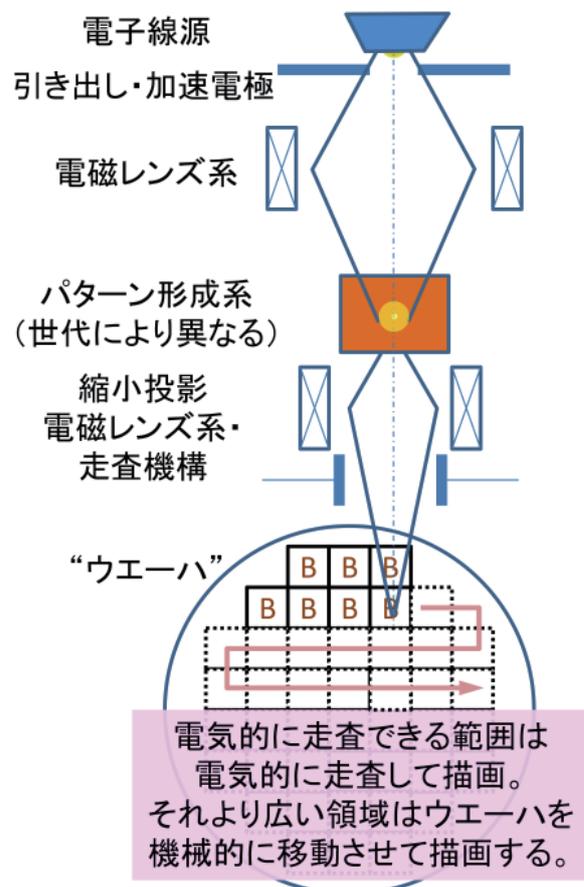


図4 電子線による直接描画装置の概念図

であるから、一般的な傾向として、電流を増やしてショットあたりの照射時間を減らすことが、描画の高速化のために必要であるといえる。

ところが、電流を増やすということは、電子が飛行する経路中を通る電子の数が増えるということであり、電子同士はクーロン斥力で反発しあう。電子一つ一つの動きは確率的で、このため電磁レンズで絞った理想的なパターン形状に対して、一定量のランダムなぼけ (blur) を生じてしまう。これをクーロン散乱 (Coulomb Scattering) とよび、電流密度とパターンのぼけの間にトレードオフの関係があることを示している。電子の飛行経路を円錐形と過程して、確率過程をシミュレーションした結果、パターンのぼけは、加速電圧 V 、電流量 I 、電子が飛翔する円錐の頂角 α 、飛行距離の全長 L として (図 5)、

$$V^{-(4/3)} I^{(3/4)} \alpha^{-1} L^{(3/4)} \quad (3)$$

に比例するという結果が得られた。それぞれの変数に対する指数は先行研究 [2][3][4] によって差があるが、傾向としては類似しており、(3) 式を、コラムの設計指針を導く基本式であると考えられる。すなわち、加速電圧 V は高く、電流は低く、飛行円錐の頂角は大きく、飛行距離は短くすることによって、クーロン散乱によるパターンのぼけを抑制することができる。



2. 提案するプログラマブル成形ビーム多軸電子線直接描画技術の概要

電流密度とクーロンぼけのトレードオフを解消すると同時に、単位時間あたりのウエーハ処理枚数を向上させる技術として筆者は、多数の電子線コラムエレメント (CE) を縦横に並列に並べ、それぞれが独立して描画を行なう方式を提案する (図 6)。これは、ステッパー装置や現行

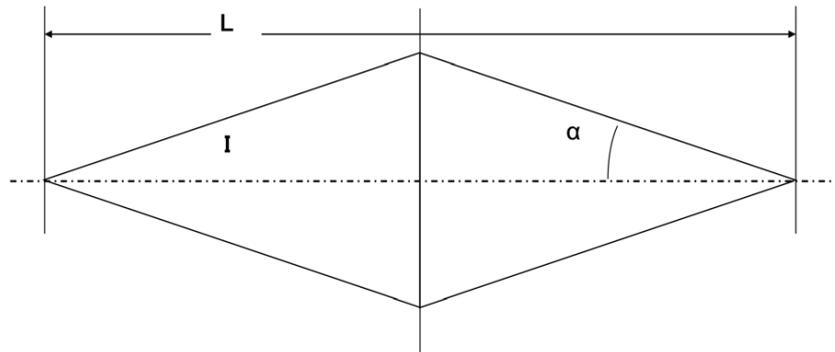


図 5 電子が飛行する経路の形状図

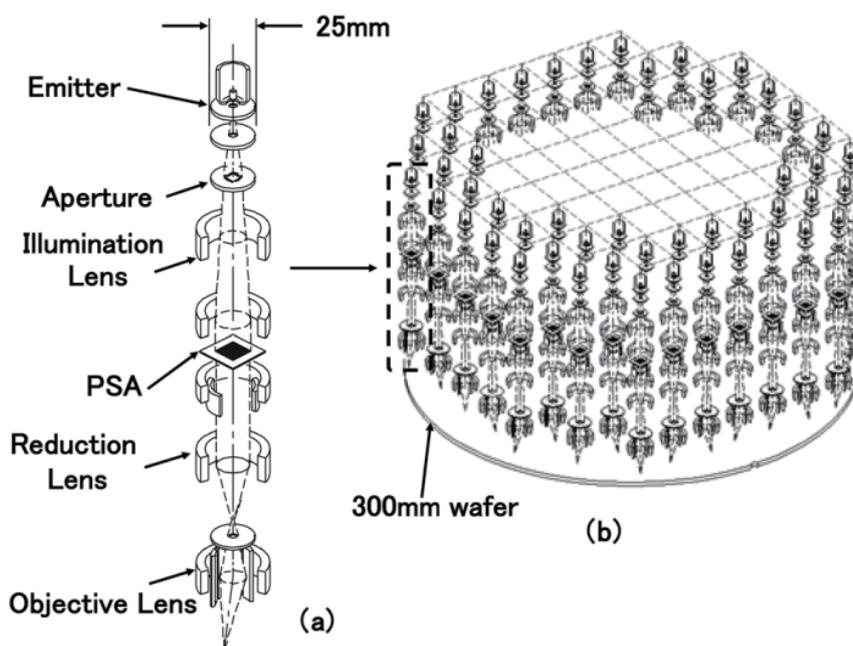


図 6 提案するプログラマブル成形ビーム多軸電子線描画装置

の電子線直接描画装置による描画が、1系統のみの露光系を用いてウエーハの移動と露光を時間を追って実行する「時間直列」方式であることに対して、コラムエレメントを複数系統用意し、一度に描画を行なう「空間並列」方式であるといえる。

コラムエレメント単体には、高速描画のための新しい仕組みを導入する。それはプログラマブル成形ビーム (Programmable Shape Beam, PSB) という方式で、1回のショットで露光される領域を多数の正方形形状のビームから構成し、正方形の組み合わせによって描画パターンを生成する方式 (液晶ディスプレイやドットプリンタの原理と同じ) である。例えば1度に描画できるショット領域の大きさを $3.2 \mu\text{m}$ 角とし、これを 50×50 個の 16nm 角のドットで構成することを想定する。1つのショットでは、 48nm のスペースで離散的に並んだ 16nm 角の正方形を照射し、位置を 16nm ずつずらしながら、ドット群を縦 $4 \times$ 横 4 の合計 16 回投影することによって、 $3.2 \mu\text{m}$ 角の全ての領域を 16nm 角の正方形で描画することができる (図7)。

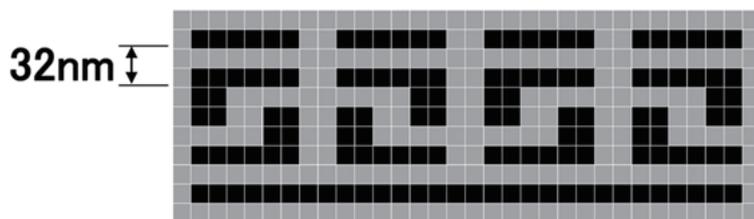


図7 PSBによる典型的露光パターンのイメージ図

電子線描画装置は歴史的に、高速化のために

第一世代：ガウシアン形状の微小スポットビーム

第二世代：縦横比を変更可能な矩形による可変整形ビーム (VSB)

第三世代：良く使う形状をステンシルで用意し転写するキャラクタ投影 (CP)

の順に工夫が重ねられてきたこと (図8) を踏まえ、本PSB方式は、柔軟な形状を定義できるキャラクタ投影方式と位置付けることができる。

具体的なコラム構成を図9に示す。電子線源からPSA素子に照射されたビームはまず、スプリッターによって 50×50 個の正方形に切り取られる。スプリッターの直下に、ビームの通過と阻止を個別に制御可能なブランカー素子があり、ブランカーによって進路を曲げられなかった電子ビームのみがPSA素子を通り、ビームを電磁レンズ系で絞って照射パターンとする。その際、丸いアパーチャーと電子線群全体の進路を曲げるブランカーを通して照射 / 非照射を制御することができる。

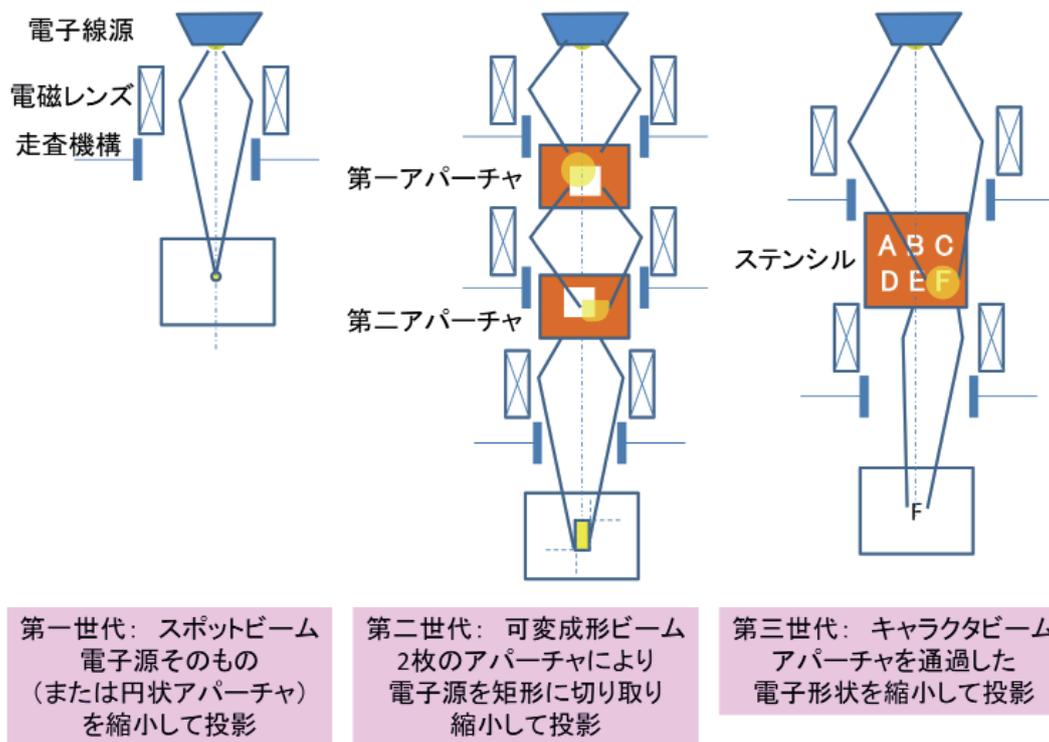


図8 電子ビーム露光技術の推移

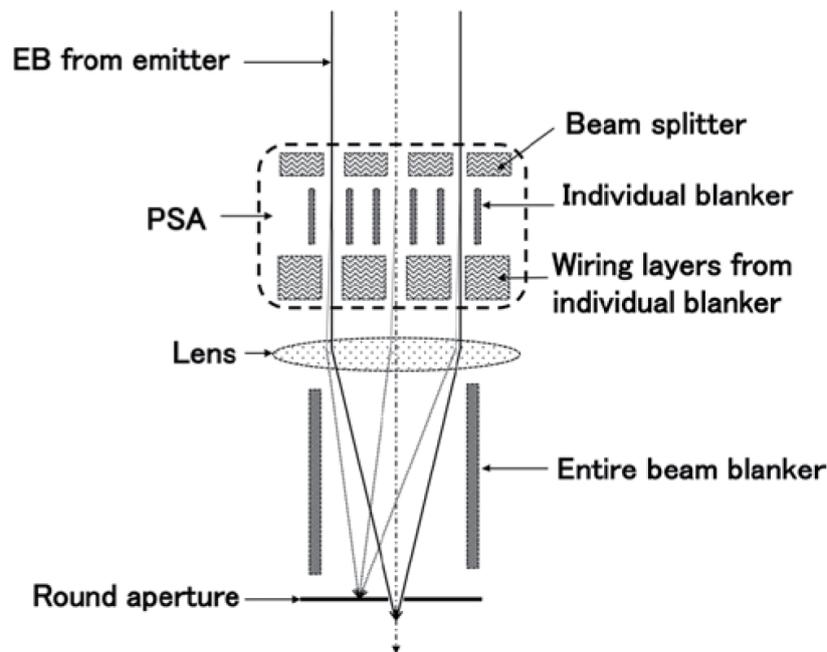


図9 PSB カラムの概念図



3. PSB システム構成要素の研究開発

2章に示した構想に基づき、PSB システムを構成する3要素:(1) 永久磁石を用いた小型レンズ, (2) レニウムシースを持つ小型電子銃, (3) PSA デバイスのそれぞれについて、基礎的な実験に成功している。このうち、レニウムシースを持つ小型電子銃の開発に際し東京大学微細加工拠点の協力を得た。

3.1 レニウムシースを持つ小型電子銃

多軸化成功の鍵となる技術の一つが、小型電子銃である。筆者は、 LaB_6 素子を、 $80\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ の超小型サイズに切り出して、それをレニウム (Re) のシースに装着することで実現することを試みている (図10)。最終目標は、電流値 $100 \sim 200\ \mu\text{A}$ 、電流密度 $6 \times 10^6\ \text{A}/\text{cm}^2$ 、面内均一性95%以上の電子放出性能を持ち、1700Kで動作する電子銃である。現在までの実験によって、950Kにおいて、6kVでの引出し電圧によって $10\ \mu\text{A}$ のビーム電流を得ることができている。典型的な放出パターンを図11に示す。

3.2 小型電子銃の微細加工の意義と東京大学における試み

LaB_6 は、広く電子線源として使われている材料であるが、従来の LaB_6 を用いた電子銃チップは、それ自体をつまんで旋盤に装着できる大きさであった。今回の研究によりは従来の LaB_6 チップの微細さの常識を体積で100分

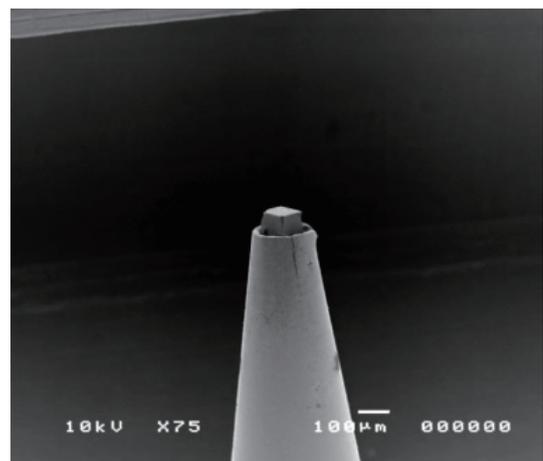


図10 レニウムシースに埋め込んだ LaB_6 電子銃の電子顕微鏡写真

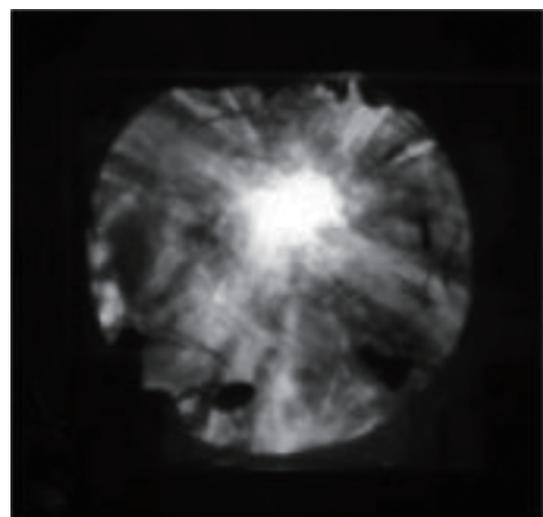


図11 典型的な放出パターン

の1に変え、そのような微細加工が可能であることを示すことによって、構造的・價格的に1種の革新を起こしたともいえる。

東京大学拠点では、検討の末、公開装置のダイシングソー装置 DISCO DAD-340 を用いて切断加工を行なった。ダイシングソー（またはダイサ）は、ダイヤモンド粉末を含むブレード（刃）によって切断加工を行う装置である。DISCO 社が世界の8割のシェアを持ち [5]、同分野での日本のポテンシャルは非常に高いといえる。ダイサによる切断によって、切断と同時にブレードによってある程度端面の研磨を行なうことができるため、電子放出に際して素子近傍において不要な電界集中が生じることを防ぐことを期待していたが、実験によってその有効性を示すことができた。

一方、切断を実際に行なってみると、単に装置を使えば切断可能であるというものではなく、切断の前後で素子が飛散しないための固定技術が特に重要であるとわかった。これについて、東京大学拠点の久保田雅則助教の技術補助のもと、筆者ともどもクリーンルームに入って細心の注意をもって試行錯誤を行ない、切断工程を開発した。結果として、微細な LaB₆ の小結晶を結晶ダメージなく切り出すことができ、電子銃素子として動作することがわかった。この経験によって、LaB₆ 素子を 100 μm 以下に微細加工をするやり方が存在することがわかったので、現在では基本的に微細加工を行なう民間の業者に委託して素子を手入している。一方委託業者がさばききれない緊急事態が生じることがあり、そのときは東大拠点を利用している。



4. おわりに

次世代の電子線直接描画装置として、一時間あたりの描画枚数を10枚以上という、非常に高いスループットを持つ装置の研究開発を行なっている。微細な点を組み合わせ、任意のパターンを大面積（3 μm²以上）に

一括投影するプログラマブル成形ビーム方式のコラムエレメントを多数並列に並べる形式を提案し、その基礎技術を開発している。小型電子銃として、80 μm × 80 μm × 500 μm の、結晶ダメージの少ない LaB₆ 微小片を用いることを提案し、東京大学拠点の支援で初めてそのような微細素子の切り出しに成功し、それをレニウムから成るシースに実装して電流源として動作することを確認した。今後は各部品のさらなる高性能化を行ないつつ、プロトタイプ装置の試作を目指す。

大学の支援拠点を実際に利用してみてわかったことは、民間のサービスと比較して、

- ・繊細なノウハウがあるもの
- ・研究要素のあるもの
- ・量産ノウハウがまだ固まり切っていないもの
- ・所用個数がまだ見込めないもの
- ・急を要するもの

について強みを持つということであった。これは、大学では研究を生業とする教職員が支援を行なっていることに困っていると考えられ、民間のサービスに無い機能を相補的に大学等の機関が担当することによって、研究の迅速な進展に寄与することができた。



参考文献

- [1] H. Yasuda et. al, J. Vac. Sci. Technol. B 30(6), Nov/Dec 2012, 06FC01-1
- [2] T. Groves, D. L. Hammond, and H. Kuo, J. Vac. Sci. Technol. 16, 1680 (1979).
- [3] G. H. Jansen, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 298, 496 (1990).
- [4] J. L. Mauer, H. C. Pfeiffer, and W. Stickel, IBM J. Res. Dev. 21, 514
- [5] 半導体製造装置データブック 2012 電子ジャーナル

(株式会社 PARAM 安田 洋, 東京大学 三田 吉郎)



【お問い合わせ】

微細加工プラットフォーム

東京大学

☎ 03-5841-1506

E-mail nanotech@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

ホームページ

<http://nanotechnet.t.u-tokyo.ac.jp/>