

第13章 EUVA(技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構) - 世界レベルのEUV露光システム技術の開発 -

日本での研究開発が先行していた EUV 露光であるが、その後日本の研究開発が停滞している間に、インテルを中心とした EUVLL が発足するなど米国の産官学共同による本格的な取組みが先行してしまった。2002 年 6 月に経済産業省と新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて、EUV 光源と露光装置の開発を目的とした技術研究組合として極端紫外線露光システム技術開発機構(EUVA)が設立された。光源メーカー、露光装置メーカー、半導体メーカー 10 社がメンバー企業となった。また、大学もこの研究開発に参加した。並行して文部科学省もリーディングプロジェクトを作り大学に研究資金を提供した。

大学によるアカデミックな研究とデータベースの蓄積も生かしながら、研究開発を進めた。EUVA 設立当初は 2002 年度から 2005 年度までの予定であったが、EUV 露光技術の実用化に向けて 2007 年度まで 2 年間延長した。2005 年度の目標である集光点出力 10Wを中間目標とし、50W を最終目標とした。

EUV 光を発光させるには、レーザー光でターゲットにエネルギーを供給しプラズマを発生させ EUV 光を発光させる LPP 方式と、放電によってプラズマを発生させ EUV 光を発光させる DPP 方式の二つがあるが、EUVA では両方式の研究開発を行い、2 方式とも中間目標、最終目標を達成した。試作露光装置を露光装置メーカーが製作し、Selete でハーフピッチ 26nm の実際の転写を行なった。

先行する米国のオルバニナノテクや IMEC に対しては約 1 年の遅れではあるが、実際の転写を実現し、世界のレベルに追いついた。これからの製品開発はメーカーの自主開発が中心となるが、2008 年度から 2010 年度までは、EUVA 光源の高信頼化について NEDO から EUVA に資金が提供され、EUV マスクについては 2006 年度から Selete に資金が提供されている。EUVA の成果が実用化につながることを期待したい。そのためには、国際的な連携を進め世界の半導体メーカーが注目するような実績を上げることが必須である。

1. 横綱級プロジェクト EUVA の設立

半導体製造技術の基本の1つは、微細パターン形成技術であり、特に露光技術の微細化は重要な鍵を握っている。これまでの半導体集積回路の高集積化、高速化などの性能向上は、回路パターンの微細化に支えられて発展してきたといっても過言ではない。露光技術の微細化は、露光装置、マスク、レジストおよびプロセスなどの高性能化によって進展してきたが、なかでも露光装置の高性能化は重要であり、使用光源波長の短波長化と光学系の改良とがキーポイントとなっている。

光源波長の短波長化は、高圧水銀ランプのg線(波長 436nm)からi線(365nm)、さらに

KrF レーザ(248nm)、ArF レーザ(193nm)へと進み、次世代露光技術としては極端紫外線(EUV)露光技術(13.5nm)が期待されている。ハーフピッチ 45nm ぐらいまでの微細パターンの半導体製造には、ArF レーザと液浸技術を使っている。その次のハーフピッチ 32nm の微細パターンについては、ArF レーザと液浸技術と描画パターンを二つに分けて 2 回描画する技術などが使われる。しかし、描画に使われる光の波長が、微細パターンよりも長いので、マスクに様々な補正パターンを加えて描画しなければならない。これに対して波長 13.5nm の EUV 露光が実現できれば、マスクは補正の不要な単純なパターンとなること、解像力増強技術(RET)があまり必要ではなくなるなどのメリットが大きい。

日本の EUV 露光技術の提案は世界に先行して始まり、1988 年には NTT の木下氏(現兵庫県立大学)が転写パターンを報告している。ベル研が 50nm の解像結果を報告したのは翌年であった。また、基本となる 6 枚ミラー光学系の特許は 1986 年頃にキヤノンが出願している。しかし、その後日本の研究開発は停滞し、1997 年になってインテルを中心にした EUVLL が発足するなど米国の産官学共同による本格的な取組みが先行した。日本では翌 1998 年に ASET/EUV 研でシンクロトロン放射光を用いたレジストやマスクなどの基礎研究が姫路工業大学(現兵庫県立大学)の木下教授等と連携して開始された。¹NEDO は 2001 年度に、「極端紫外線(EUV)露光システムの基盤技術研究開発プロジェクト基本計画(案)」を作成した。²

この基本計画に基づいて、2002 年 6 月に経済産業省と NEDO の支援を受け、13.5nm の EUV 光源と露光装置の開発を目的として技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構(以下 EUVA³という)が設立された。メンバー企業は、ギガフォトン(株)、コマツ、ウシオ電機(株)、キヤノン(株)、(株)ニコン、富士通(株)、NEC エレクトロニクス(株)、(株)東芝、(株)ルネサス テクノロジーであった。

i

EUV 光源技術については LPP(Laser Produced Plasma、レーザープラズマ)光源と DPP(Discharge Produced Plasma、放電プラズマ)光源の二つを研究開発することになった。中間段階として 2005 年度末にはそれぞれ 10W の出力(中間集光点)を実現することを目標とした。ⁱⁱ大学との共同研究も EUVA からの再委託と言う形で計画された。大学に対しては、2003 年度から文部科学省のリーディングプロジェクトによる資金も別途提供された。

リーディングプロジェクトには、実験サイトとして、大阪大学、レーザー技術総合研究所、兵庫県立大学、九州大学、宮崎大学の 5 サイト、シミュレーションサイトとして、首都大学東京、北里大学、山梨大学、核融合技術研究所、日本原子力研究開発機構、奈良女子大学、岡山大学、広島大学の 8 サイトが参加した。リーディングプロジェクトの目的は「EUV 光源プラズマ物理を解明し、実用光源に対する指針を提示すること」であった。⁴

ⁱ 設立当初は、三菱電機、日立製作所がメンバー企業であったが、その後合併によりルネサスがメンバー企業となった。

ⁱⁱ 2002 年度の当初計画では、2005 年度が最終年度で 10W が最終目標であったが、2007 年度まで計画が延長され、10W が中間目標、2007 年度末の 50W が最終目標となった。

EUVA の設立により、日本の EUV リソグラフィ開発体制は以下ようになった。EUVA は堀池プロジェクトリーダーのもとに光源開発、装置開発を担当し、光源開発については産総研とも共同開発を行なった。ASET はマスクとプロセスおよび絶対波面計測を担当し、MIRAI プロジェクトはマスクとその欠陥計測を担当することになった。また、EUVA が開発した光源と 2 枚系投影工学装置を使った SFET(小フィールド露光装置)と民間企業で製作する ツール(フルフィールド露光装置)の評価は Selete が担当することになった。⁵

日本の EUV リソグラフィ全体研究開発計画を図 1. に示した。当初計画そのものではなく、途中で変更された部分も反映させたものである。

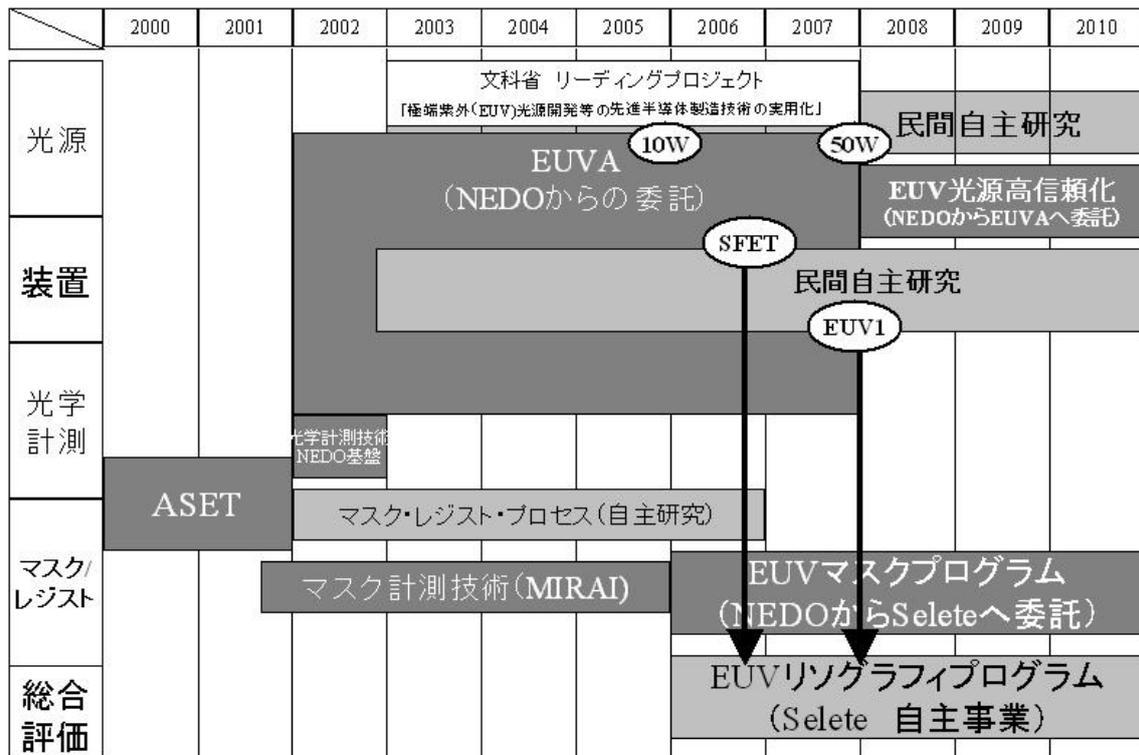


図 1. 日本の EUV リソグラフィ全体研究開発計画⁶

EUVA・ASET の顧問であり、研究開発の指揮を執る堀池靖浩東大教授は EUVA Newsletter 第 2 号で「EUV リソグラフィ開発は始まったばかりである。我が国は、エキシマで気を吐くギガフォトン・コマツ、Sn ターゲットの産総研、世界的ランプメーカーのウシオ、それを支援する 6 大学、そして世界の 70% のステッパーシェアを有するキヤノンとニコンの協業からなる国家プロジェクトで世界に挑戦し、巻き返す所存である」と述べている。⁷また、EUVA 設立パーティには尾身幸次科学技術政策担当大臣も駆けつけ「日本経済の活性化のために今後 300 億円規模の技術開発プロジェクトを 10 件立ち上げたいと考えているが、その中でも EUVA は横綱級である」と激励した。⁸文字通り、産官学の共同研究体制を作ったわけである。

2003 年度からは、EUV 露光装置技術のキーである高精度かつ高再現性の非球面ミラー

加工技術とその計測技術、および実用化に向けて大きな課題となるミラーのコンタミネーションに対する制御技術が追加された。また 2001 年度から ASET で実施していた 6 枚系投影光学系全体を計測する EUV 光絶対波面計測技術のテーマも EUVA で実施することとなった。⁹

この様にして出発した EUVA であったが、発足当初は研究開発を積極的に進めていた外国勢に比べると、研究開発の蓄積は何もないに等しく、米国ダラスでの EUVL 国際シンポジウムに参加した後、ホテルで暗澹たる気持になったと堀池リーダは述べている。¹⁰まさにゼロからの出発であった。

2. 反射ミラーと真空が必須の EUV 露光

EUV 露光装置の基本的な構造は図 2 に示すようなものである。ArF レーザまでの光源では、その波長の光を通す材料があるため、透過型のレンズを使った光学系を使うことが出来る。これに対して、EUV 露光の場合は EUV 光を透過させる材料は存在しないため、反射ミラー光学系を使わなければならない。基本となる投影光学系は 6 枚の反射ミラーを使用する。反射ミラーで反射する度に EUV 光の減衰が起こるから、光源の出力は大きくなければならない。従って、EUV 露光装置の開発においては、この光源の開発が重要である。また、EUV 光は空気があっても減衰してしまうので、装置全体を真空中に置かなければならず、光源部を囲ってしまうことはできない。そのため、高出力の光源では必然的に発生する飛散物質が反射ミラーなどに付着して反射率を低下させることを防がなければならない。

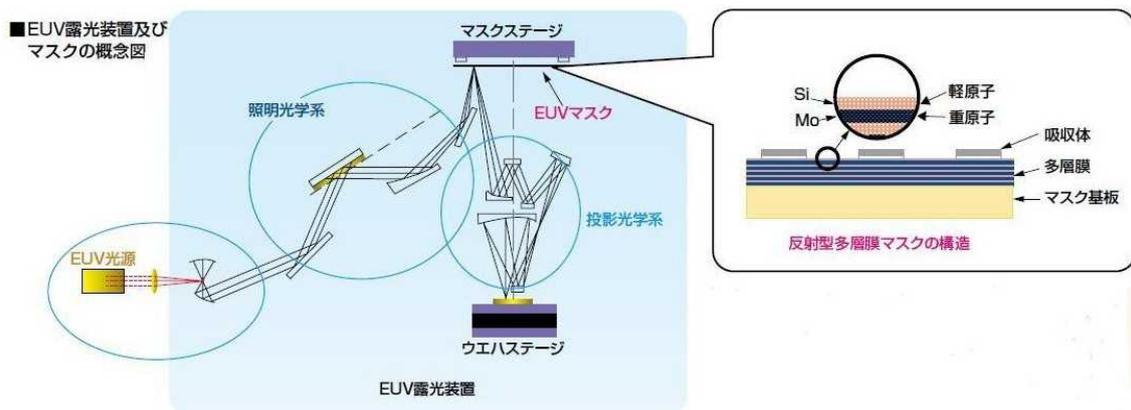


図 2. EUV 露光装置構成 (NEDO ホームページより)

EUVA の主要開発テーマは、以下の通りであった。¹¹

- ・ EUV 露光用光源技術
(高出力・高品位 EUV 光源技術の確立、EUV 光源評価およびミラー汚染・損傷評価技術開発)
- ・ EUV 露光装置技術
- ・ EUV 露光システムの仕様検討・装置評価

・ EUV リソグラフィ技術の総合調査研究

EUVA では、プラズマ光源開発は、ギガフォトン/コマツ・産総研・4 大学のチーム、とウシオと2大学のチーム、の二つのチームがそれぞれ2005年未までに中間目標として10Wの出力を達成し、試作露光装置はニコンとキヤノンが共同で開発することになった。¹²

3. メーカー・ユーザ・大学を巻き込んで研究開発を開始

EUVA は、図 3 に示すような、EUVA 集中研究所と参加企業や大学などに研究拠点を置く分散研究所であった。

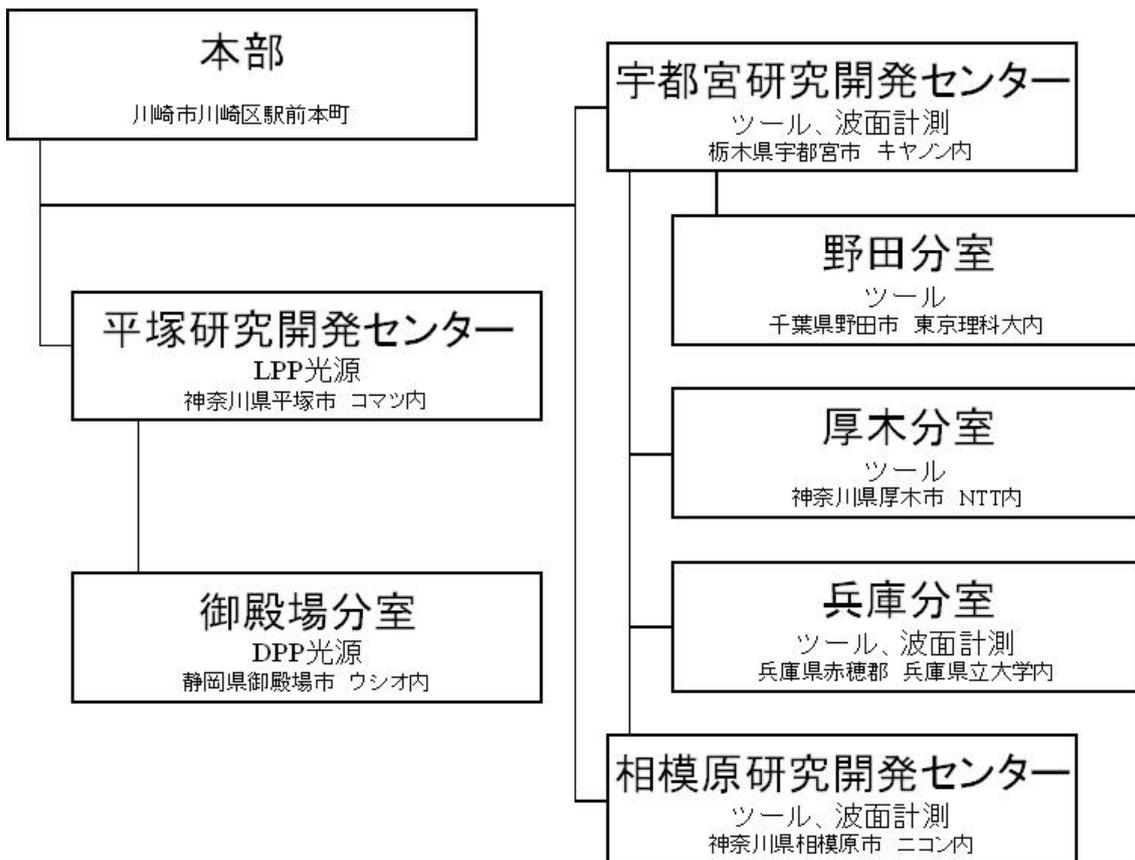


図 3. EUVA 研究開発拠点

(EUVA ホームページ¹³をもとに作成)

EUVA においては、二つの光源技術を並行して開発した。コマツの中に光源研究室平塚研究開発センターを置き LPP の研究開発を行い、ウシオ電機の中に光源研究室御殿場分室を置き DPP の研究開発を行なった。

LPP 光源を担当する平塚研究開発センターでは、2002 年 9 月に研究開発をスタートし、2003 年 6 月に集光点出力(以下出力は特に断らない限り集光点出力で表す)0.6W、8 月に 1.0W、9 月に 2.2W、12 月に 4.0W を達成し、着実に出力を向上させた。Xe をターゲット物質に使い、冷却機構と噴出しノズル等の改善で直径 30 μm から 50 μm の安定した大口径の Xe

ジェットが得られるようにしたこと、大出力の YAG レーザの開発が進んだこと、レーザ集光のマッチングの改善ができたことによる。2005 年 6 月に行なわれた 2004 年度の成果報告会では、YAG レーザ出力 1.5kW を使って、5.7W の出力が得られ、LPP 方式で当時の世界最高値であることが報告された。¹⁴LPP 光源の研究開発はゼロからの出発であったが、短期間に大きな成果を上げることができた。¹⁵

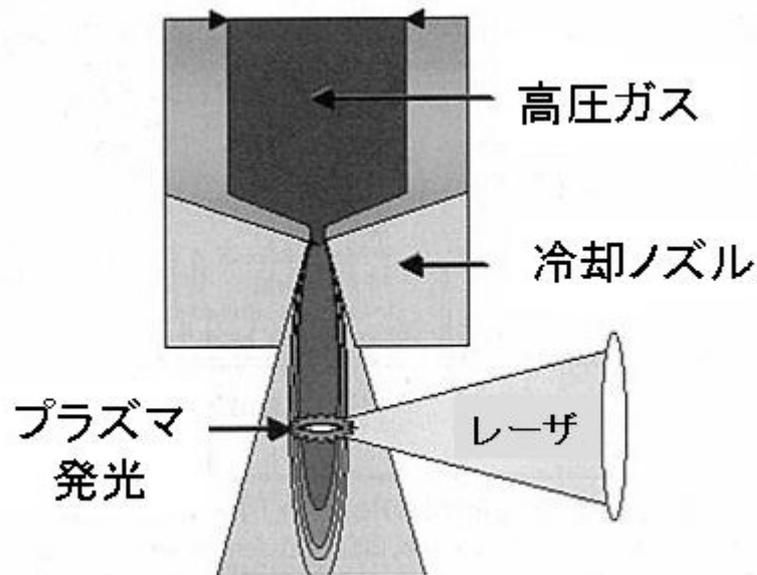


図 4. Xe を使った LPP の原理図¹⁶

DPP 光源については、Zピンチプラズマを発展させ、放電回路の低インダクタンス化や放電ガス供給条件の改善などにより、2004 年 11 月の第 3 回国際 EUVL シンポジウムで 8.4W を実現したことを発表した。さらに、2005 年 6 月の成果報告会では、放電部の改良、高速放電、予備電離の適用などで、19W の出力を達成し、2005 年度の目標 10W を 1 年前倒しで達成したことを報告した。発光種としては Xe を使用しており、発光効率の高い Sn を使えば更なる出力の向上が期待されるが、デブリ(飛散物質)対策が必要になる。¹⁷

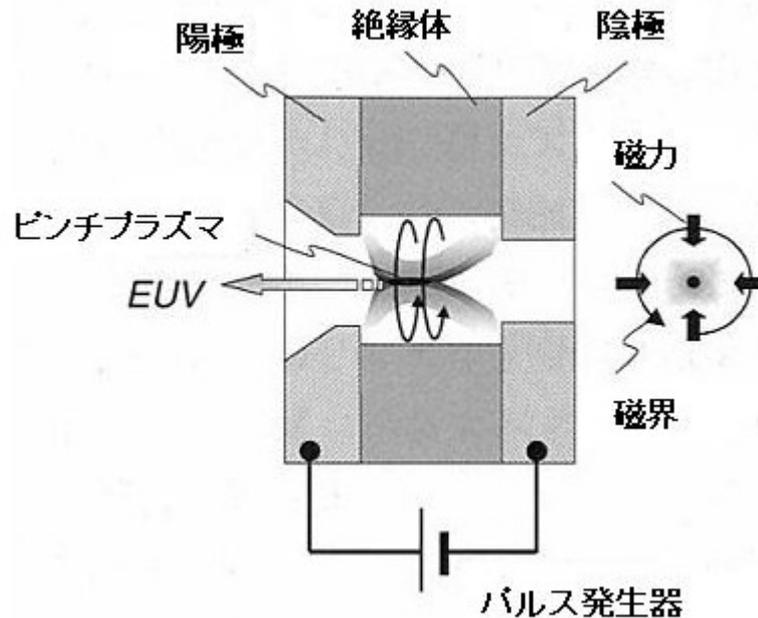


図 5. Z ピンチプラズマの原理図¹⁸

発光種として Sn を用いる研究は産業技術総合研究所で行なわれた。まずレーザーアブレーションによる微粒子ターゲットを用いる研究を行い、Sn 板に比べて 4 倍の変換効率が得られることを示した。¹⁹続いて、様々な変換効率向上のための技術を開発した。多数の微粒子を内包する液滴を生成して溶媒のみを加熱蒸発させ微粒子のみのクラスタとなったところにレーザーを照射するという方法や、SnO₂ 微粒子を分散させた水ジェットプラズマを使う方法²⁰、綿飴状ターゲット実現のために微細 Sn 高濃度懸濁液を使う方法などである。²¹さらに、EUVA では従来の Xe ドロップレット技術をベースとして、Sn ドロップレット生成に成功した。

4. 量産機へ向けた光源の開発

2005 年 11 月に開かれた EUVL シンポジウムで、ASML から量産機の光源パワーとして集光点出力 180W が提案された。これは、これまで量産機で目標としていたレジスト感度 5mJ/cm²、スループット 100 枚/時からレジスト感度 10mJ/cm²、スループット 100 枚/時に変更したためであり、それまでの量産機の目標光源パワーは 115W と 2 つの目標が併記されることとなった。2 倍近い引き上げになり、その実現には更なる努力が必要になった。

2006 年 10 月にスペインのバルセロナで開かれた第 5 回 EUVL シンポジウムで、EUVA は Z ピンチ DPP 光源で 30 から 50W の集光点出力を達成したことを発表し注目を集めた。²²変換効率が高い Sn 固体燃料に代わる SnH₄ スタンガス及び低インダクタンス放電ヘッド等による高出力化技術を開発して、これを実現した。またハロゲンガスを使ってコレクタを定期的にクリーニングすることにより、長時間の運転を可能にした。²³さらに、回転電極表面に塗布した Sn を燃料供給に使う回転電極レーザーアシスト DPP の開発へと移行した。その結果 786W の

発光点出力が得られた。固定電極に比べては発光点の面積を小さく出来る反面、変換効率の向上と繰り返し周波数の向上が課題である。²⁴DPP 光源の開発成果を図 6 にまとめた。

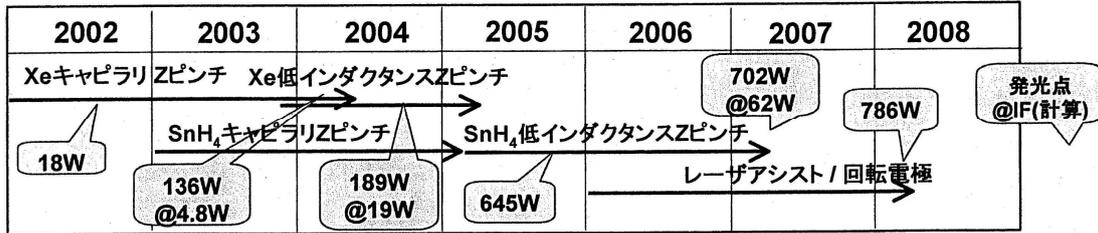


図 6. DPP 光源開発経緯²⁵

LPP 光源の開発においては、Xe ターゲットと YAG レーザの組み合わせが主流であったが、Sn ターゲットと高繰り返しパルス CO₂ レーザを組み合わせるとい、世界初の独創的な方式 (特許申請中) を考案した。²⁶CO₂ レーザ光は YAG レーザ光に比べて波長が 10 倍と長く、光がプラズマの中心部まで到達しないので、Sn 表面での飛散物質が抑制されると考えられており、実測でも飛散物質のミラーへの付着が少ないことが確認されている。²⁷この方式は原理的に高出力化に制約が少なく、100W 以上の高出力光源の実現にも期待が寄せられていた。また、高出力化のためにレーザー光のエネルギーを上げると、Sn ターゲットの飛散物質が増加しミラー汚染が起こるため集光点出力が落ちてしまう、という相反する課題に取り組んだ。ユニークな磁場による閉じ込めを使った汚染防御技術などを世界に先駆けて開発し、高速イオンは 1 テラテスラの磁場印加でイオン信号が 1000 分の 1 になることが判明した。²⁸これらの技術により、6kW の CO₂ レーザを使って集光点出力 60W 相当が実現できた事を 2008 年 2 月の SPIE Advanced Lithography で報告した。²⁹レーザー出力を 20kW にすれば、EUV 光出力は 200W までスケール可能であるとした。これらの結果から CO₂ レーザ励起 Sn 光源は、出力のスケールビリティ、高い効率、コレクターミラーが長寿命であることから、量産機へつながるアプローチであると結論つけた。図 7 に LPP 光源開発の経緯をまとめた。

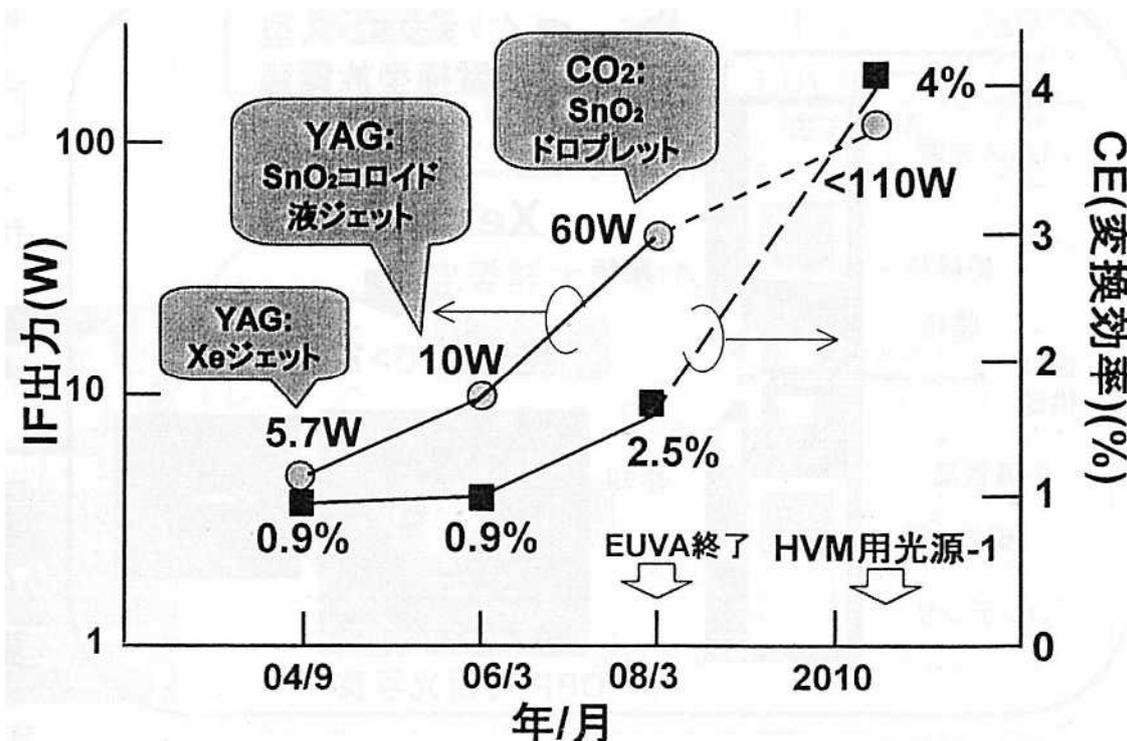


図 7. LPP 光源開発経緯³⁰

5. 光源周辺技術の開発

光源技術以外に様々な技術開発が必要であった。集光ミラー汚染・損傷の防止などがその主な項目である。

集光ミラー汚染・損傷評価技術および集光ミラー汚染・損傷防止技術の研究開発については、集光ミラーの高速イオンによる損傷は、イオン化されたターゲット物質によるものであることを実験的に確かめ、磁力を用いて高速イオンの飛来を防止するという EUVA 独自技術を開発して、イオンによる損傷を 30 分の 1 に抑えた。

6. 投影光学技術の開発

非球面反射ミラー加工技術では、IBF(イオンビーム加工)によって 0.14nmrms の加工精度を実現し、この技術が実用的に有効であることを実証した。さらに、大阪大学から導入した EEM(Elastic Emission Machining)の開発を進め、0.09nmrms の平坦性が得られることを実証した。また、計測技術についても 0.1nmrms 以下の測定再現性を実現した。

装置コンタミネーション防止については、コンタミネーション制御技術の基礎となる、微量のコンタミネーションの解析技術を確立した。この解析技術を基に、コンタミネーション加速試験を行い、加速試験法に関する基礎的知見を得るとともに、Ru キャッピングレイヤーを用いた時、H₂O 分圧を 10.6Pa 以下にすると、酸化は進まないとの有用な知見を得た。また、酸素雰囲気下で UV 照射(UV+O₂)によりカーボンコンタミネーションは除去できることを実証した。³¹

7. 大学などとの共同研究

EUVAと並行して、文部科学省のリーディングプロジェクト(LP)として、「極端紫外(EUV)光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」が2003年度から2007年度まで行なわれた。このLPとEUVAは密接な協力関係を持って研究開発を進めた。また、EUVAから大学などに研究開発の再委託が行なわれた。

さらに、リーディングプロジェクトEUV光源開発技術委員会とEUVA光源SWGを合同で開くなど、プロジェクト関係者間で情報を共有し研究開発の効率化と開発速度の向上を図った。³²また、2003年11月には、第4回EUV光源開発技術委員会と第6回EUVA光源SWGが合同で開催され、合宿形式で現状の進捗と課題を徹底的に議論し、実用化への課題の整理、分担の確認、お互いの考え方の理解を深めることができた。この光源合宿は両プロジェクトが終了する2007年まで毎年計5回開催された。³³このように、EUVAとリーディングプロジェクトの間で密接な交流が行なわれ、適切な研究開発の方針が討論された。

8. 3 グループに絞られた EUV 光源量産機サプライヤー

2008年現在、EUV光源量産機を開発しているのは、LPP方式の2グループ(サイマー社と、コマツおよびコマツとウシオ電機の合弁会社であるギガフォトン社)とDPP方式の1グループ(フィリップスEUV社とウシオ電機の100%子会社となったエクストリーム社の業務提携)である。

サイマー社は、米国サンディエゴに本社をおく光源メーカーで、これまで3,300以上の光源を設置した実績を持っている。そのうち650がArF光源であり、さらにそのうち100以上が液浸ArF用である。EUV光源開発については、ASML社がEUV量産機的光源としてサイマー社のLPP光源を採用した。技術的には、100Wバースト出力という2007年の目標を達成した。開発プログラムの焦点は、発光継続期間を長くして平均出力を上げることに移っている。ASML社との契約に従った2008年末の出荷に向けて最初のEUV光源を作っている。EUV光源についての半導体メーカーの関心は高く、社内デモも増えている。

ギガフォトン社は、2001年にウシオ電機とコマツが出資して創立された光源メーカーである。³⁴本社は栃木県小山市にあり、現在世界第2位の露光装置用レーザ光源メーカーである。2007年度には、140台弱の光源を納入した。³⁵

2007年10月に札幌で開催された国際EUVLシンポジウムや2008年2月のSPIE Advanced LithographyでEUVAがLPP光源で60Wを達成したことを発表した。高出力化の可能性は見てきたので、周辺技術を磨き光源システムとして実証し、EUV露光を量産で使えるようにすることが必要になる。SPIEで発表した技術などで現在先行しているサイマー社に勝つ、とギガフォトンの溝口開発部長は語っている。³⁶EUVAの開発成果を受けてギガフォトンでは、2010年に集光点出力110Wから140Wの光源を商品化しようとしている。³⁷

さらに、LPに参加した大阪大学、宮崎大学が提案したダブルレーザ照射によってCEを4%から8%に向上させることも期待されている。ダブルレーザ照射は、まずYAGレーザを照

射して Sn プラズマを生成し、そこに大出力の CO₂ レーザを照射するものである。

一方、DPP グループは、ウシオ電機を中心に 1 グループ化した。ASML 社の デモ機、ニコンの EUV1 デモ機に DPP 光源を搭載し、システムとしての経験を積んできており、回転方式 DPP による量産光源の実用化を目指している。

Xtreme technologies GmbH (以下、エクストリーム社)は、2001 年に Lambda Physik AG (ラムダ・フィジック社)と光学部品メーカーの Jenoptik AG (以下イエナオプティック社、ドイツ)グループがそれぞれ 50%を出資した合併企業として設立³⁸されたが、現在は 100%ウシオ電機の子会社である。³⁹

Philips Extreme UV (以下フィリップス EUV 社)は、2001 年に、フィリップス社とフラウンホーファーレーザ技術研究所⁴⁰の合併会社として EUV 光源を開発するために設立された。フラウンホーファーレーザ技術研究所が持つ高温プラズマ中の放電に関する豊富な経験とフィリップス社が持つ照明技術におけるガス放電の豊富な経験を組み合わせることで製品レベルの EUV 光源を開発することを目指している。

2007 年 10 月 30 日に、札幌で開催中の「2007 国際 EUVL シンポジウム」において次世代の EUV 露光に必要な光源を共同開発するため、エクストリーム社⁴¹とフィリップス EUV 社は業務提携すると発表した。

2008 年 2 月 26 日に米国サンノゼ市で開催された SPIE Advanced Lithography 2008 でエクストリーム社とフィリップス EUV 社は、量産装置 (HVM) で必要とされる EUV 光源の出力目標を十分に上回る 500W を実証したと発表した。両社は原理実験により、DPP 方式の EUV 光源で、これまで数キロヘルツ程度しか確認されていなかった繰り返し周波数を、100kHz 程度まで、放電入力を 6J 程度までスケールアップでき、露光装置集光点では 500W 以上の出力が達成できることを示した。「光源の高出力化は、EUV 開発の主たるボトルネックのひとつとなっており、量産化のためには 180W 以上の出力がターゲットとなっていました。実験では、競合する LPP 方式より、我々の DPP 方式の光源のほうが、はるかに大きい出力が比較的容易に実現可能であることが示されました」と、フィリップス EUV のゼネラルマネージャ、マーク・コスアウト氏はコメントした。また、エクストリーム社の吉岡正樹社長は、「これは DPP の拡張性を示す大きな進歩です。両社の協力による大きな成果であり、世界初の EUV 光源の実用化という両社共通の事業目標の可能性を示すものです」と語った。両社は、放電ランプのように、電極間でプラズマを発生、加熱させる DPP 方式の EUV 光源技術を採用しており、電極を大面積化し回転させるというアイデアが大きなブレークスルーへと結びついた。この技術によって、高出力時の過度な熱負荷を簡単に取り除くことができ、電極の長寿命化も実現できる。⁴²

8. 試作露光装置の製作

EUVA で開発した技術を使った、小規模フィールド露光装置とフルフィールド露光装置の試作をキヤノンとニコンが行なった。小規模フィールド露光装置である SFET は、2 枚系の投影

光学系を EUVA が担当し、システム全体をキヤノンが担当して開発し 2006 年 9 月末に完成した。⁴³レジストの研究と投影光学系の検証が目的であった。投影光学系の検証としては、26 nmライン & スペースの解像ができた。光源としては、当初 LPP 光源を使い、露光面積の拡大のためにその後 DPP 光源に変更した。

フルフィールド露光装置の EUV1 はニコンが開発し、2007 年上期に Selete に納入された。⁴⁴これは、オランダの ASML 社から 2006 年 8 月にベルギー IMEC と米オルバニナノテクに出荷されたフルフィールド露光装置の 機に続くものである。2008 年 2 月に米国サンノゼ市で開催された「SPIE Advanced Lithography 2008」で Selete は、EUV1 の露光結果を発表した。⁴⁵ライン & スペース(L/S)パターン 3 種類(単純 L/S, エルボーL/S, 孤立・密集混在 L/S), コンタクト・ホール・パターン 1 種類の転写結果である。いずれも, 30 nm のパターンをきれいに転写できたうえ, 一部の欠陥を除けば 28nm パターンも解像できた。Selete の成果は, ASML のユーザ・サイトでの転写開始(2007 年 5 月, IMEC およびオルバニナノテク)からは 1 年弱の遅れとなった。しかし今回の Selete の結果は, EUV1 の持つ高い光学性能を実証した、と言える。⁴⁶

9. ASML 社製フルフィールド露光装置の使用状況

ASML 社から IMEC とオルバニナノテクにフルフィールド露光装置が 2006 年に出荷されている。それらの露光装置の状況を 2008 年 2 月の SPIE Advanced Lithography における発表などからまとめた。

IMEC では、ASML のフルフィールド露光装置の設置が終わり、300mmEUV リソグラフィラインに統合され、EUV リソグラフィが量産に対してどのくらいの準備ができているかを評価できる段階になった。第 1 層のコンタクトホールに EUV リソグラフィを使った 32nm ハーフピッチの SRAM を実際に作るうとして第 1 層の露光とエッチングを行なった。この実験の結果は、転写パターンは良好、オーバーレイは可であった。フレアとシャドウイングの定量的な予測は可能で、修正が可能だった。⁴⁷

米 AMD 社は、オルバニナノテクのフルフィールド露光装置を使って、テストチップを製作したと、SPIE Advanced Lithography 2008 で発表した。テストチップはまず、AMD 社で 193nm 液浸露光装置を使ってトランジスタまで加工された。その後オルバニナノテクにある ASML 製の EUV 露光装置で金属配線の第 1 層を露光し、エッチングと金属デポジション工程を施した。AMD 社での電気試験で、テストチップは 193nm の液浸露光で製造したテストチップとほぼ同一の性能を示した。⁴⁸

10. NEDO からの資金

2002 年度から 2007 年度まで EUVA プロジェクトは実施された。その間に NEDO から提供された資金は図 8 の通りである。この中には、EUVA への委託費のほか、産総研への光源研究、ASET へのレジストの評価研究も含まれている。

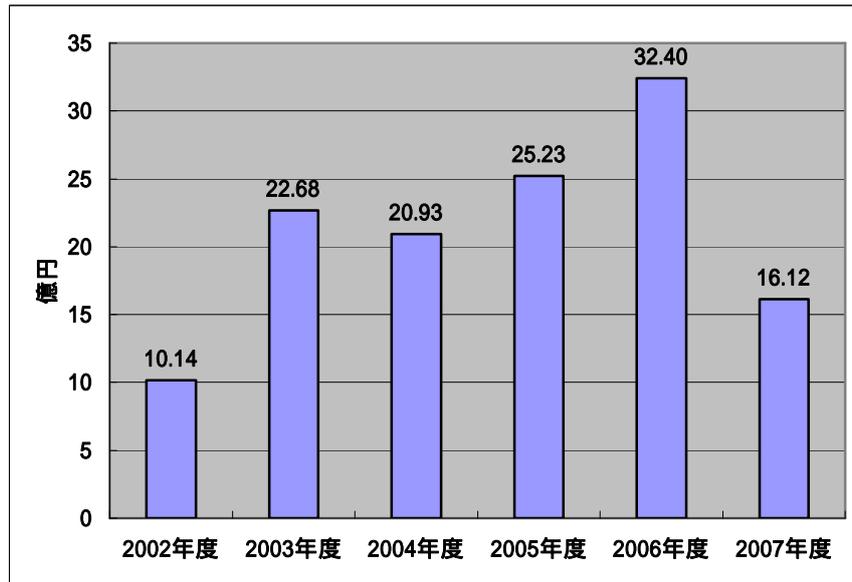


図 8. NEDO からの開発資金⁴⁹

2006 年度には、2006 年度加速予算 3 億 7 千万円と 2007 年度からの前倒し予算 4 億円が提供された。⁵⁰これは 2006 年度に含まれている。研究開発の進捗と必要に応じた機動的な資金提供が行なわれたことを伺わせる。2007 年度は実績ではなく、計画である。

11. なぜ EUVA が成果を上げられたのか

(1) 大学との連携

EUVA と大学との連携は、お互いが独自の研究開発資金を有しながら密接な打ち合わせの機会を持っている点の特徴である。大学側は、文部科学省リーディングプロジェクト「極端紫外 (EUV) 光源開発等の先進半導体製造技術の実用化」研究に参加して独自の資金と研究テーマを持ち、EUV 光源プラズマ物理を解明し、実用光源に対する指針を提示することを目的とした。一方、EUVA は参加各社の分担金の他に NEDO からの資金を導入している。そして、両者の定期協議の場として、EUV 開発企画政策委員会およびその下部委員会である光源開発技術委員会が設けられており、研究開発状況や産業界のニーズ動向などの相互確認が緊密に行われたことが成果に結びついていると思われる。

(2) 適切な時期に行われた徹底的な議論

EUVA 発足後 1 年半が経って研究が本格化してきた時期 (2003 年 11 月) に EUV 光源開発に携わる研究者 40 名余りが合宿形式で合同討論を行い、現状の進捗と課題を徹底的に議論した。これによって実用化への課題の整理、分担の確認、さらにはお互いの考え方の理解を深めるということができた。

このような合宿討論はその後も 1 年に 1 回のペースで行われ、光源開発の進捗に大きな影響を与えたと言える。光源開発は EUV 露光装置開発において最も重要な課題であり、また基礎研究と実用機開発との両面を同時に追求しなければならず、大学等とメーカーとの協力と分

担とが欠かせないということから、このような議論が行われる必要性和必然性があったとも考えられる。

(3) テーマの絞り込み

EUVA 光源開発プロジェクトにおける中間目標達成のための光源方式絞り込みに関して、光源絞込み評価委員会が 2003 年 11 月に行われ、1 月に結果が公開された。これは、EUVA 出力 4W(中間集光点)などの中間目標を達成するための光源方式を、EUVA 及び関係機関の提案する方式の中から、LPP、DPP 各 2 方式程度に絞り込み、開発の加速を図る目的で行われた。

審査では、中間目標の光源仕様に対する現時点での達成度、及び各光源の将来の実用化可能性ポテンシャルをオリジナリティ、コスト、拡張性の観点で各研究機関から提出された資料を評価し、研究担当者からのヒアリングを実施して審査が行われた。その結果、LPP 方式では 4W を早期に達成できる候補として XeJet/YAG レーザ励起方式(EUVA 平塚研究センタ)と 4W 以降の光源候補として Sn 系微粒子ターゲット/レーザ励起方式(産総研)が選ばれた。DPP 方式は、EUVA 御殿場分室で東工大、熊本大学の成果を統合(磁気圧縮回路/キャピラリーZピンチ放電方式)して 4W 達成を目指すことを結論とした。また、各大学で取り組まれたリーディングプロジェクトの寄与は高く評価され、EUVA との連携を一層強化すると共に研究開発を加速、深化させていくよう要望した。⁵¹

2006 年 1 月の光源技術絞込み委員会では、プロジェクト目標を達成する技術としては Sn-DPP で 50W、量産革新技术としては Sn-CO₂ レーザ励起 LPP と結論づけた。⁵²このように研究開発の進捗に応じて適切なテーマの絞り込みが随時行われたことが、EUVA の成果に大きく寄与したと考えられる。

(4) 大学研究者にとっては貴重な体験だった

2007 年度 EUVA 成果報告会でリーディングプロジェクトの初代のプロジェクトリーダーであった井澤靖和教授は「リーディングプロジェクトの成果が EUVA ですぐに生かされると言う点では、大学の人間にとっては楽しいプロジェクトだった。企業と協力してやる研究の楽しさを体得したと思う。」と述べ、大学の研究者にとっては貴重な体験ができたプロジェクトであったことを述べた。

12. これで世界に並んだ、次は製品化のステップ

EUVA は、EUV リソグラフィ技術開発のプロジェクトであるが、オルバニナノテクの INVENT や IMEC で取り組んでいる EUV リソグラフィプロジェクトとは位置付けが異なる。オルバニナノテクや IMEC の EUV リソグラフィプロジェクトは、量産技術の開発のために必要なプレコンペティティブな領域をカバーしようとしている。露光装置だけではなく、半導体チップそのものを試作できるフルラインを持ち、週 7 日 24 時間稼働できる試作ラインで新しい露光装置をその他の半導体製造装置と結合して量産技術開発のための研究開発を行なっている。EUVA は、光源開発と投影光学系技術に重点を置き、EUV リソグラフィに必要な出力を持つ光源技術を

開発すると共に、EUV 光をマスクから忠実にウェーハへ導く投影光学系の技術、ミラーなどの汚染防止、非球面反射ミラーの加工技術、波面計測技術などの開発を行なった。光源メーカーと装置メーカーもプロジェクトに参加し、開発成果をもとに商品化を行なおうとしている。並行して文部科学省のリーディングエッジプロジェクトもあり、大学における研究成果の活用、アカデミックな視点からの課題解決への取組みも行なわれた。

ここで、本書のテーマとなっている基礎的共通的技術について考えてみたい。基礎的共通的という時には、誰にとって基礎的共通的かということに注目する必要がある。半導体メーカーにとっては、EUV リソグラフィ技術は基礎的共通的技術である。しかし、前項でも述べたように光源技術に重点があるのではなく、量産ラインの開発に重点がある。つまりオルバニナノテクやIMECで行なわれているような事が期待されている。EUVAはその一部を担当したが、EUV リソグラフィ量産技術研究開発全体をEUVAに期待するのは過大な期待であろう。

光源メーカーや露光装置メーカーにとっては、EUVAは競争領域を共同してカバーしたものと言えるのではないだろうか。EUVA参加企業の中には、DPP光源メーカーとLPP光源メーカーが各1社、露光装置メーカーが2社参加しており、EUV光源の研究開発にはEUV光源プラズマ物理の解明などアカデミックな研究も必要であることから、一箇所に集まる集合研究所ではなく分散形式のバーチャル研究所方式をとった。光源合宿のような、課題を整理し、徹底的な議論を行い、分担を決めて開発を推進していく仕掛けを採用し、分散研の弱みを一部補強しつつ成果を上げることができた、とも見ることが出来る。

EUVAもリーディングプロジェクトも2007年度で終了する。EUVマスクについては、NEDOの次世代半導体材料・プロセス基盤技術の開発(MIRAI)の次世代マスク基盤技術開発として、Seleteに委託される。また、2008年度からEUV光源高信頼化技術開発が追加され、EUVAに委託された。また、Seleteは自主事業としてリソグラフィ設計技術を中核に、露光技術、レジスト材料・プロセス技術、プロセス評価技術、フレア補正技術の開発を行なう。

その結果、今後のEUVリソグラフィ開発体制としては、冒頭の図1のようになった。光源開発はEUVAの成果を生かしたメーカーの自主開発に高信頼性という面でNEDOのプロジェクトがサポートする、露光装置開発はEUVAの成果を生かしてメーカーが自主開発し、SeleteがNEDO委託事業とEUVリソグラフィ設計技術開発を中核とした自主事業を行なって実用化を目指す。

前述のように光源メーカーは、3グループになり、露光装置メーカーは、ASML、ニコン、キヤノンの3社しか存在しない。また、レジスト、マスクメーカーについても日本企業の世界シェアは高い。このような状況を考えると、本来であれば、EUVA、Selete、MIRAIが国際市場に開かれた統合研となり、総合的にEUVリソグラフィの性能向上を担当していくのが最もスムーズな発展の方向であると思われる。(赤城 三男、相崎 尚昭)

¹ 超先端電子技術開発促進事業 1999年度成果報告書 219ページより

² 「極端紫外線(EUV)露光システムの基盤技術開発に関する調査研究」調査研究報告書、NEDO「EUV露光システムの開発」検討委員会、2002年3月

-
- ³ EUVA; Extreme UltraViolet Lithography System Development Association
⁴三間園興、「リーディング・プロジェクトの成果概要」、2007 年度 EUVA 研究成果報告会、2008 年 5 月
⁵ http://www.euva.or.jp/research_results/s_and_i_of_japan_euvl_d.html#Abstract
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p01014/h19kihon.pdf>
⁶ EUVA Newsletter 第 4 号、2003 年 4 月と NEDO の「次世代半導体材料・プロセス基盤 (MIRAI) プロジェクト」基本計画 (2008 年改定)などを組み合わせて作成
⁷ EUVA Newsletter 第 2 号、2002 年 12 月
⁸ EUVA 小川専務理事談
⁹ EUVA Newsletter 第 4 号、2003 年 4 月
¹⁰ 2007 年度 EUVA 成果報告会での堀池プロジェクトリーダーの発表より
¹¹ EUVA Newsletter、第 4 号 2003 年 4 月
¹² EUVA ホームページ Present Status and Issues of Japan EUVL Development, Yashiro Horiike EUVA/ASET (The University of Tokyo)より
http://www.euva.or.jp/research_results/s_and_i_of_japan_euvl_d.html#Abstract
¹³ <http://www.euva.or.jp/contact/gotemba.html>
¹⁴ EUVA Newsletter 第 17 号、2005 年 6 月
¹⁵ 2007 年度 EUVA 成果報告会での堀池プロジェクトリーダーの発表より
¹⁶ 堀田和明、「リソグラフィ用 EUV 光源」、レーザー研究 2001 年 10 月号の図をもとに作成
¹⁷ EUVA Newsletter 第 17 号、2005 年 6 月
¹⁸ 佐藤弘人、「EUV 用ディスチャージ生成プラズマ光源の開発」、超精密 2005 年 11 月号の図をもとに作成
¹⁹ EUVA Newsletter 11 号、2004 年 6 月
²⁰ EUVA Newsletter 17 号、2005 年 6 月
²¹ EUVA Newsletter 23 号、2006 年 6 月
²² EUVA Newsletter 第 25 号、2006 年 10 月
²³ Y. Teramoto et al, "Development of high-power Sn-fueled DPP EUV source for enabling HVM", SPIE, 2006 International EUVL Symposium, Oct. 2006
²⁴ EUVA Newsletter 27 号、2007 年 2 月
²⁵ 堀池靖浩、日本の EUV リソグラフィ技術の開発、2007 年度 EUVA 研究成果報告、2008 年 5 月より
²⁶ ギガフォトンホームページ Technology より
<http://www.gigaphoton.com/topics3c.html>
²⁷ 「大容量化に陰りなし EUV 露光が実用へ」日経マイクロデバイス 2007 年 7 月 30 日号 85 ページ
²⁸ EUVA Newsletter 第 29 号、2005 年 6 月
²⁹ A. Endo et al, "CO₂ laser-produced Sn-plasma source for high-volume manufacturing EUV lithography", Proc. of SPIE Vol. 6921, 692110T-1 (2008)
³⁰ 堀池靖浩、日本の EUV リソグラフィ技術の開発、2007 年度 EUVA 研究成果報告、2008 年 5 月より
³¹ 極端紫外線 (EUV) 露光システム開発プロジェクト「中間評価報告書 (案) 概要より
<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/hyouka/17h/6/4-2-3.pdf>
³² LP 研究体制より
<http://www.ile.osaka-u.ac.jp/project/EUV/aim-organization%20/AIM.html>
³³ EUVA Newsletter 8 号 2003 年 12 月
³⁴ www.gigaphoton.com

-
- 35 ギガフォトン社ホームページより
- 36 日経マイクロデバイス、2008年3月号
- 37 H. Mizoguchi, “EUV Source Supplier Update, Gigaphoton”, SEMATECH EUV Source workshop 2007 より
http://www.gigaphoton.com/e/pdf_files/EUVSourceSupplierupdateGigaphoton.pdf
- 38 <http://www.xtremetec.de/profile/index.htm>
- 39 Tech-On 2008/05/26
<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20080526/152360/>
- 40 the Fraunhofer Institute of Laser Technology
- 41 <http://www.xtremetec.com/>
- 42 ウシオ製品技術ニュース(2008年2月27日)より
<http://www.ushio.co.jp/jp/NEWS/products/20080227.html>
- 43 EUVA NEWSLETTER 25号、2006年10月
- 44 <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20080228/148165/>
- 45 I. Mori et al., “Selete’s EUV Program: progress and challenges”, Proc. of SPIE Vol. 6921 6921102-1 (2008)
- 46 <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20080228/148165/>
- 47 G. F. Lorusso et al., “Imaging performance of the EUV alpha demo tool at IMEC”, Proc. of SPIE 6921 6921100-1 (2008)
- 48 <http://pc.watch.impress.co.jp/docs/2008/0304/amd.htm>
- 49 2007年度実施方針から作成
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p02030/h19jisshi.pdf>
- 50 EUVA Newsletter 29号、2007年6月
- 51 EUVA Newsletter、9号 2004年2月
- 52 EUVA Newsletter、21号 2006年2月