

### 4.31 リソグラフィ用EUV光源の開発 Development of EUV Light Source for Microlithography

溝口 計、遠藤 彰、小森 浩<sup>a</sup>

ギガフォトン株式会社 研究部 〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400

<sup>a</sup>コマツ 研究本部 〒254-8567 神奈川県平塚市万田1200

Hakaru MIZOGUCHI, Akira ENDO, Hiroshi KOMORI<sup>a</sup>

Research Division, Gigaphoton Inc., 400 Yokokurashinden, Oyama, Tochigi 323-8558 Japan

Research Division, <sup>a</sup>Komatsu Ltd., 1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa 254-8567 Japan

Resolution of optical microlithography process becomes smaller and smaller. Wavelength of the light source for these optical lithography reduced from KrF, ArF to F<sub>2</sub> to meet the resolution requirement. Recently EUV is spotlighted as promising candidate for next generation lithography light source. This paper summarizes the requirement and issue for the EUV lithography light source.

Keywords: EUV light source, Extreme ultraviolet lithography, Microlithography, Laser produced plasma

#### 1. はじめに

半導体プロセスの微細化の進展に伴って、光リソグラフィ技術も微細化が急速に進展している。これに伴い極端紫外光 (Extreme Ultra Violet) ( $\lambda = 10\text{--}13\text{ nm}$ ) を用いた EUV リソグラフィが 2006~2007 年に産業界より要求されている。本稿においては、リソグラフィ用 EUV 光源開発の課題と取り組みについて報告する。

#### 2. 露光装置の高性能化と光源の短波長化

半導体プロセスの微細化の進展に伴って光リソグラフィ工程に用いられる露光装置の高性能化が進められている。最近では、スキャニングレンズステッパー (略称: スキャナー) と呼ばれるレチクルとウエハを同期移動させレンズの最大口径一杯に利用する装置が実用化され、主流の露光装置となっている。光学系の精度も高精度が要求され、世界の主なステッパー 3 社 (ニコン社、キヤノン社、ASML 社 (オランダ)) のうち日本に 2 社が存在し、日本が世界需要の半分以上を供給している。これまでの露光装置の進歩はマクロに言うと、半導体の微細化に歩調を合わせた解像力の向上の歴史と言える。すなわち開口数 NA の限界に挑む結像光学系の開発と並行して光源の短波長化が進められてきた。デザインルール 0.25  $\mu\text{m}$  以降リソグラフィ光源の主役となってきた狭帯域 KrF エキシマレーザーは 1995 年以降量産工場への導入が本格化して、急速に立ち上がり 2000 年度には世界で約 500 台程度の需要があった。また狭帯域 ArF エキシマレーザーも 2001 年からは本格的に立ち上がる兆候を示している。2001 年末現在で KrF、ArF を合計した量産リソグラフィ用エキシマレーザーの世界での累積台数は 2000 台に迫りつつある。

これらの状況は SIA (Semiconductor Industry Association: 半導体工業協会) の国際技術ロードマップ ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors: 国際半導体技

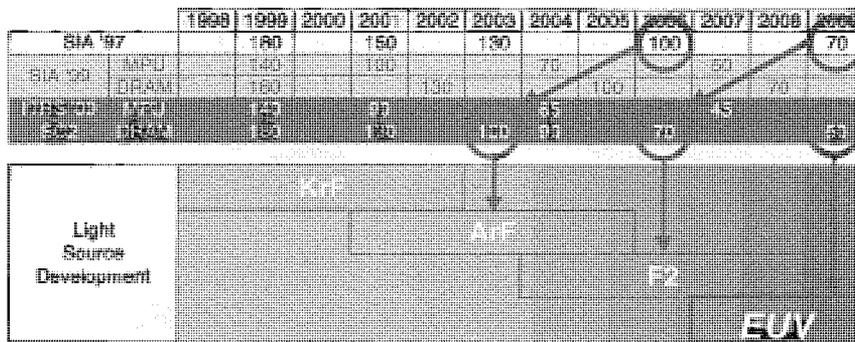


図 1. ITRS の変遷と光源開発のロードマップ

術ロードマップ)からも見る事ができる。ITRSの微細化スケジュールは年々前倒しが進み、1997年末版から1999年度版で1年の前倒し、そして2000年版 Scenario2 (SC2)で2年の前倒しと加速しつつある。図1にITRSの変遷と光源開発のロードマップを示す。これまで光源は水銀ランプのg線、i線を経てDeep UVレーザーであるKrFエキシマレーザー(λ=248nm)、ArFエキシマレーザー(λ=193nm)が屈折光学系(Dioptric System)と組み合わせて露光装置として使われてきた。最近前倒しになった2000年版のITRSシナリオ2ではNGL(Next Generation Lithography)としてF<sub>2</sub>レーザー(λ=157nm)を光源に使ったF<sub>2</sub>レーザーリソグラフィを2003年末に縮小投影反射光学系(Cataoptric System)の露光装置として要求されている。さらに極端紫外光(λ=10-13nm)を組み合わせたEUVリソグラフィを2006~2007年に45nmノード以細の露光技術として要求されている。半導体プロセスの微細化の進展に伴って光源の短波長化が急速に進展している。

### 3. リソグラフィ用実用EUV光源の開発の経緯

米国では半導体メーカーのコンソーシアムから資金提供を受け、EUVL tool development programがスタートし、1997年にはEUVLLC (EUV Limited Liability Company)がAMD、Intel、Motorolaにより設立されている。その後Micron、Infineon、IBMが加わり現在は6社体制で進められている。この計画ではデザインルール100nmのβ装置の研究開発、プロセス研究、マスク、光学系、レジスト、EUV光源、計測技術供給メーカーのサポートを使命としており、Lawrence Berkeley、Lawrence Livermore、Sandiaなどの国立研究所へも研究開発を委託する形でスタートしている[1]。一方、日本では1998年から4年計画で、ASET厚木センターでEUVリソグラフィの要素技術研究プログラム[2, 3]、および産総研でのEUV光源の基礎研究がスタートした。ASETのプログラムの中でSOR施設やSOR光源を使って、レジスト、光学系要素、計測技術、プロセスの研究が行われてきた。近年の検討ではEUVリソグラフィにおいて実用的なスループットを得るには、光源への要求は当初の想定に比べはるかに高出力化し、100W級のEUV光源が必要となると予想されている。さて、わが国では45nmテクノロジーノード以降の半導体製造に適用可能な光源、装置等から構成される極端紫外線(EUV)露光システムを確立することを目的に、研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構(略称 EUVA 専務理事:小川眞佐志)が2002年5月に創立された。装置メーカー5社(ウシオ、キヤノン、ニコン、コマツ、ギガフォトン)と半導体5社(東芝、日本電気、日立、富士通、三菱電機)の合計10社が推進母体となり研究

開発を開始した。

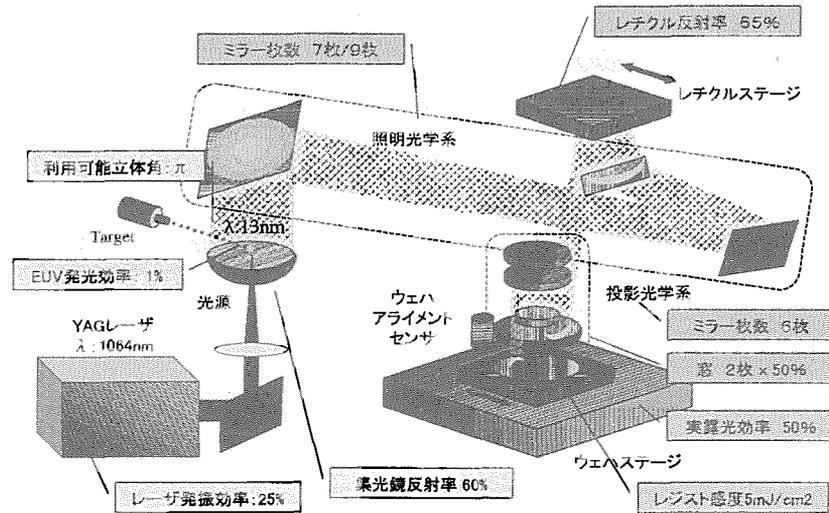


図 2. EUV 露光装置の模式図

#### 4. EUV 光源の要求仕様と課題

波長 13.5nm の極端紫外光源と縮小投影反射光学系を組み合わせた露光装置の開発が、2007 年の実用化を目指して進められている。図 2 に EUV 露光装置の模式図を示す。従来の露光装置と比較して特徴的な点は、レチクルを含めた全ての光学素子が反射系で構成されている点である。用いられる EUV 光源は、図 2 に記載のようにレーザー光をターゲットに照射することによって、13 nm 帯 EUV 光を得るレーザープラズマ方式：LPP (Laser Produced Plasma) と大電流パルス放電によって生成されるプラズマから EUV 光を得る放電プラズマ方式：DPP (Discharge Produced Plasma) に大別される。EUVA のプロジェクトにおいては、ギガフォトン、コマツは LPP 方式の EUV 光源開発を実施している。また、DPP 方式については露光用高圧水銀ランプで実績のあるウシオ電機が担当して開発を行なっている [4]。

2001 年秋に松江で開催された EUVL ワークショップや 2002 年秋にダラスで開催された EUVL シンポジウムまでの議論を通して、EUVL 用光源に求められるパワーは、目標とするスループットが 100 wph (枚ウエハー/時間) と高いレベルに設定された。必要とされる多層膜鏡の枚数が従来の 6 枚から 13 枚に増え、点光源をリングフィールド照明に変換する照明光学系での多層膜鏡の数が、以前の ETS の 2 枚から 6 枚に 4 枚も増やされて反射率 65% の多層膜鏡も 7 枚増えた。結局、均一性を確保しつつ如何に多層膜鏡の使用枚数を減らせるかが、EUVL 露光機実用化における最大の技術課題のひとつになっている。一方では、透過率が 1/20 に低下するために光源には 20 倍大きなパワーが要求され、実験機では数 W であったが、実用機では利用可能な光源輝度が 50W から 150W とされている。表 1 に量産用の EUV 露光装置用の光源要求仕様を示す。また、光源の出力パワーの定義も従来まちまちであったものが、発光点から集光鏡で集められた集光点での出力パワーに定義が統一されつつある。要求パワーが一桁跳ね上がり、光源輝度の定義が厳しい定義とされたために、必要レーザーパワーは 5 年前の ETS の 100 倍に増大した。高出力化の技術的困難は当然であるが、光源コストも膨大に増加してしまう可能性が高い。従来技術の改良

表1. EUV露光機光源要求仕様

項目	要求仕様
必要時期	2006~07年(量産は2009年~)
中心波長	13.5nm
EUV出力(集光点) 2%BW@13.5nm	80~120W
集光ミラーの寿命	1年または $1.6 \times 10^{11}$ パルス
Etendue	1.0~3.3mm <sup>2</sup> str
繰り返し周波数	6kHz以上
パルス間出力再現性	±0.3%以内(50パルス平均)

だけでは問題の解決は望むべくもなく、根本的に新しい概念による光源が必要で、基礎過程にまで立ち戻った研究が求められている。この一環として日本原子力研究所関西研究所とレーザープラズマの理論・実験による評価を計画している。

#### 5. おわりに

EUVリソグラフィに関してはそのポテンシャルの高さは米国EUVLLCを中心とする活動により証明されつつあるものの、依然数多くの工学的問題を抱えている。今後、スタートが遅れた日本が開発研究をどう加速し、必要時期までに間に合わせるかが課題である。特にEUV変換効率の向上の実現が必須であり、このためには産学ならびに関連する研究所との連携により基礎的な現象の理解を深めることが重要と考える。著者らもこの厳しい状況の中ではあるが、産業人としてその産業化のために関係各位の暖かい励ましと叱咤の中で全力で本研究開発の成功にむけて、邁進する所存である。

#### 参考文献

- [1] Chuck Gwyn "EUVLLC Program Status and Plans": Presentation of the 1<sup>st</sup> EUVL Workshop in Tokyo (2001)
- [2] 木下博雄：レーザー研究 第27巻、第1号(1999)
- [3] 岡崎信次：応用物理 第69巻、第2号(2000)
- [4] A. Endo, H. Sato, H. Komori, Y. Watanabe, H. Kondo, H. Mizoguchi, T. Tomie (AIST), K. Toyoda, Y. Horiike." New EUV Light Source Development Project in Japan" 1st International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography (October 14-17, 2002 Dallas)