

《EUVL量産導入の実現に向けて》

光源開発が焦点となったEUVL EUV光源開発は日本人に有利



微細加工研究所 所長 湯之上 隆

トランジスタの高集積化とコストダウンを続けるためには、EUVL量産機の実現が望まれる。EUVL否定論者は多いが、光源さえできればEUVLが実現する段階に突入した。EUV光源開発ではSnの液滴にレーザを照射してプラズマを発生させるLPP方式が有望視されており、2012年に蘭ASMLに買収された米Cymerが日本のギガフォトンをリードしている。しかし、洗浄やコータ&デベロッパなど液体材料を使う装置分野では日本が圧倒的な強みを発揮していること、EUV光源開発ではSnの液滴の精密制御がポイントであることから、この光源開発は日本人に有利であると考えられる。

もし微細加工技術がなかったら

1971年に米Intelが「4004」プロセッサを発売した。この時、トランジスタの集積度は約2300個、トランジスタ1個当たりのコストは1ドル、トランジスタサイズは約10 μ mだった(図1)。

それから約40年以上が経過した。ムーアの法則通り、トランジスタの集積度は2年で約2倍ごとに増大し、今や最先端プロセッサには10億個を超えるトランジスタが詰め込まれている。トランジスタサイズは、スケーリング則に従って3年ごとに0.7倍に縮小し、20nm以下になった。また、トランジスタ1個当たりのコストは10⁻⁸以下になった。

もし、微細加工技術がなかったら、10億個を超えるプロセッサの1辺は10km以上になる。またトランジスタ1個が1ドルのままだったら、プロセッサの価格は10億ドル(約1000億円)になる。これでは誰も、PCやスマートフォンを買うことはできないだろう。

コストダウンは微細化だけで実現したものではないが、一説によれば微細化の寄与率は80%以上になるといふ。2012年、PCおよびス

マホの出荷台数は、それぞれ、3億5000万台および7億1000万台だった。今年2013年にスマホの出荷台数は10億台を超える見通しだ。誰もがPCをポケットの中に入れることができるようになった背景には、微細加工技術のたゆまぬ進展があったことは間違いない。

今後も微細化は続くのか

現在、最先端の微細加工にはArF液浸露光装置が使われている。また、レジストスリミングやダブルパターンニングにより、解像限界以下の20nmの微

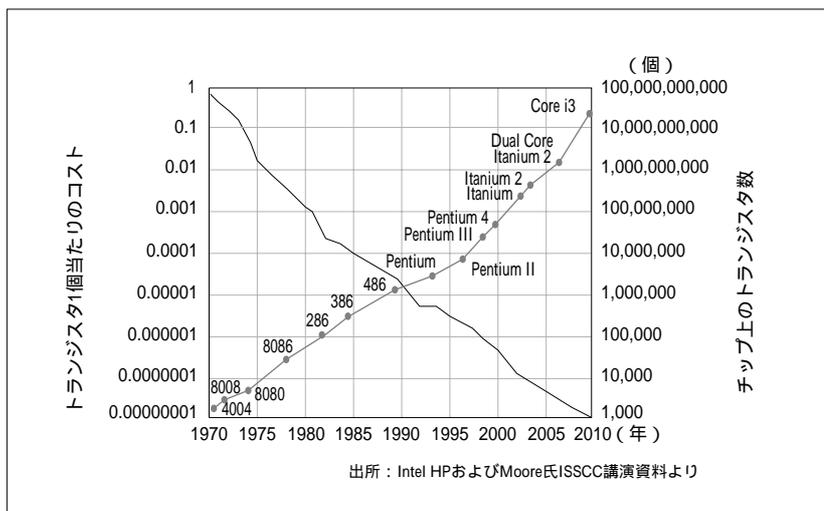


図1 ムーアの法則

表1 EUVL光源メーカーの開発状況

光源メーカー		Cymer	ギガフォトン	XTREME Technologies		
出資者		ASMLが買収	コマツ	ウシオ電機		
		Intel				
		Samsung				
		TSMC				
光源方式		LPP	LPP	DPP		
開発状況 (2013年SPIE発表)	発表(開発)時期	2013年	2013年	2012年 Q3	2012年 Q4	2013年 Q1
	バースト出力	40W	8W	59W	45W	51W
	運転時間	6時間	10分			1時間
	安全性	±0.2%				
	Duty比	92%	16%	20%	100%	80%
	実効出力 目標350~500W	36.8W	1.3W	11.8W	45W	40.8W

細加工が実現している。ダブルパターニングを繰り返すことにより、10nmレベルの微細加工が可能になるとの報告もある。

しかし、ダブルパターニングの適用はマスク枚数や工程数の増大を招く。従って、微細化してもトランジスタ1個当たりのコストを下げることは難しい。また、ダブルパターニングが適用できるのは単純な繰り返しパターンのみであるため、設計に大きな制約を設けることになる。その結果、チップサイズを縮小できるかどうかは不明である。

そのため、次世代スマホにはTSVを用いた3次元プロセッサの適用が進められている¹⁾。しかし、DRAMとプロセッサを積層した後、誰が性能や品質を保証するのか、プロセッサの発熱の問題をどう解決するのかなど、新たな課題が指摘されている。

このような状況から、今後も集積度を増大させたい、トランジスタ1個当たりのコストダウンを推し進めたい、そのためには、これまで通り2次元での微細化を推進したいという欲求が半導体業界には根強くある。その解決策は、結局、EUVL (Extreme Ultra Violet Lithography) の実現に他ならない。

太陽系圏内に入ってきたEUVL

2007年にリソグラフィの国際学会に出席した時、EUVL技術の困難さを示すために、次のような例え話が講演で話されていた。

「EUVLの実用化までの道のりは果てしなく遠い。それを視覚的に銀河系の図を用いて説明する。地

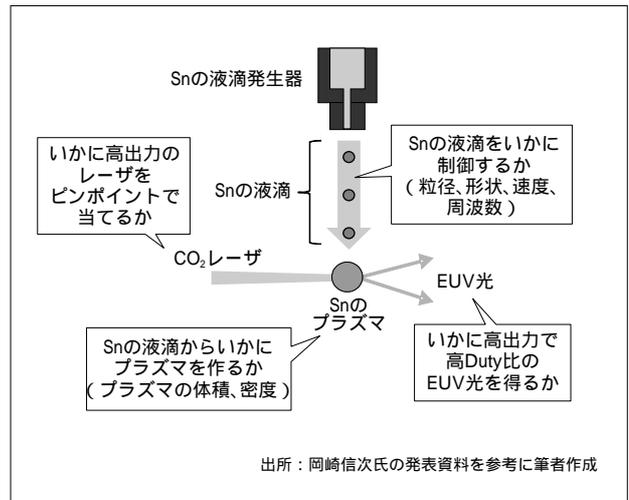


図2 Laser Produced Plasma (LPP) 方式のキーポイント

球を含む太陽系はここにある。そして、EUVLの量産機は、地球から遥か彼方10万光年離れた銀河系の端っこにある。人類がEUVLの量産機に到達するには、それほど困難な道のりを乗り越えなくてはならない。

その後、半導体業界ではEUVLの量産適用は不可能という空気が漂っていた。ところが、2012年、EUVLを巡る慌ただしい動きがあった。Intel、Taiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC)、韓国 Samsung Electronicsが、世界で唯一EUV露光機の開発を続けている蘭ASMLへの投資を発表した。そのASMLは光源メーカーの米Cymerを買収することになった²⁾。

元日立製作所で、現在、光源メーカーのギガフォトンの顧問をしている岡崎信次氏からは、今年春に、「EUVL量産機は、太陽系圏内に入ってきた」という話を聞いた。EUVLの実現性が、俄然クローズアップされてきた。

最大の問題はEUV光源

岡崎氏によれば、「光源さえできれば、EUVLは実現する」という。光源の出力増大がEUVL実現の最大の課題であるとのことである。

現在、EUV光源開発を行っているメーカーは、Cymer、日本のギガフォトンおよびウシオ電機の3社である。この3社が2013年のSPIEで発表した内容をまとめてみた(表1)。

まず、EUV光源には、LPP (Laser Produced Plasma)

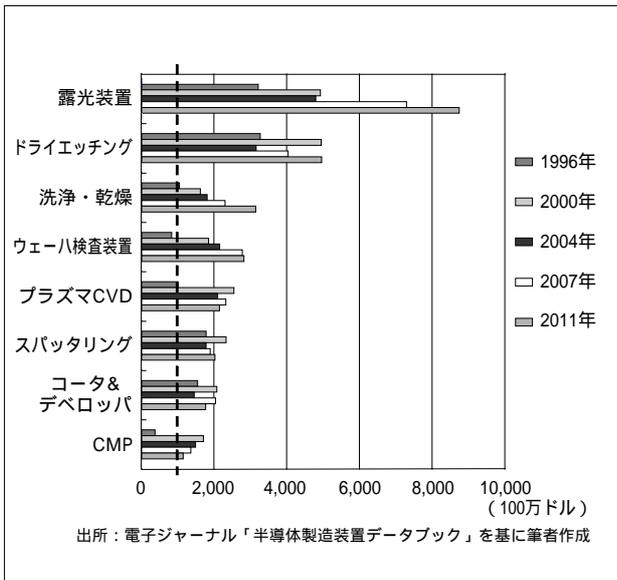


図3 10億ドルを超える主要装置分野

とDPP (Discharge Produced Plasma) の2つの方式がある。前者はSn (スズ) の液滴にCO₂レーザを照射してプラズマを発生させ、そのプラズマから出てくるEUV光を取り出す方式である (図2)。一方、後者は、Snの回転電極間で放電させてプラズマを発生させ、そこからEUV光を取り出す。この際YAGレーザを照射して放電のトリガとする。

ArF液浸が実現しているスループット150~180枚/hを達成するためには、実効出力で350~500Wが必要となる。実効出力とは、パースト出力 (瞬間的な出力) × Duty比 (レーザのOn/Off比) の積で計算される。表1からは、実効出力順に、ウシオ電機 (45W)、Cymer (36.8W)、ギガフォトン (1.3W) となっていることがわかる。

Cymer対ギガフォトン

前掲の岡崎氏によれば、「Snのプラズマは高温であり、DPP方式は、プラズマが放電電極の近くに存在するので、電極が溶けてしまうという問題があったが、回転電極でこれをしのいでいる状況である。しかし今後の高出力化を考えると、これでどこまでしのげるのかは疑問であり、EUV光の出力増大は難しい。従って、本命はLPP方式だろう」という。

もしそうなら、EUV光源の開発競争は、Cymer対ギガフォトンの戦いとなる。Cymerとギガフォトン

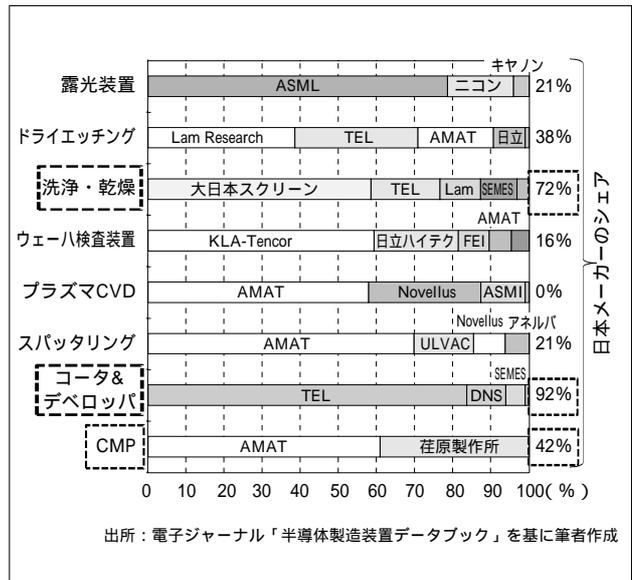


図4 主要製造装置分野のメーカー別シェア (2011年)

は、現在使用されているKrFおよびArFエキシマレーザ光源では、互角のシェア争いを演じている。そして、出資者で見れば、ASML、Intel、TSMC、Samsungの海外多国籍軍と、日本の建機メーカー、コマツの闘いとも言える。

2013年のSPIEの発表では、Cymerがすべての結果でリードしていると言えるだろう。しかし、投入したCO₂レーザに対するEUV出力への変換効率は、ギガフォトンの方が高いという話もある。目標の実効出力350~500Wを実現するには、少なくとも数年以上の開発が必要であり、このままCymerが勝利する保証はない。

この開発競争の行方はどうなるか? 筆者はLPP方式のEUV光源開発には、日本人に有利な側面があると考えている。その根拠を説明したい。

製造装置における日本の強みと弱み

半導体チップ製造には十数種類の製造装置が必要である。そのうち、市場規模が10億ドルを超えるのは、露光、ドライエッチング、洗浄・乾燥、ウェーハ検査、プラズマCVD、スパッタリング、コータ&デベロッパ、CMPの8種類である (図3)。96年~2011年までの推移では、露光、洗浄・乾燥の市場規模が増大していることがわかる。露光装置の規模増は、装置単価の高騰による。また洗浄・乾燥とウェーハ検査装置については、微細化の

表2 日本が弱くなった装置分野

装置分野	トップメーカー	競争力の要因
露光装置	ASML	モジュール化、標準化、機差が小さい、スループットと稼働率
ドライエッチ	Lam Research	モジュール化、標準化、プラットフォーム化、エッチ・アッシュ・洗浄の連続処理
検査装置	KLA-Tencor	標準化、ソフトウェア、イールドマネジメントコンサルタント
成膜	AMAT	モジュール化、標準化、プラットフォーム化、複数工程のクラスタツール化

進展により、パーティクル除去が極めて難しくなり、洗浄工程数が増大していることに原因がある。

これら8種類の装置分野について、企業別のシェアを図4に示した。この図から、日本メーカーが弱い分野と強い分野があることがわかる。露光、ウェーハ検査、プラズマCVD、スパッタリングは日本のシェアが低い。一方、洗浄・乾燥、コータ&デベロッパ、CMPのシェアは高い³⁾。

日本が弱い分野について、海外メーカーがどのような競争力を発揮してトップシェアを獲得しているかを分析してみた(表2)。すると、ある共通項が見えてくる。日本が弱い分野では、標準化やプラットフォーム化が競争力の要因になっている。すなわち、日本は、装置全体のシステム化やアーキテクトに弱点があることがわかる。

一方、日本が強い分野についても同様の分析を行った(表3)。その結果、やはり、競争力要因に共通項がある。日本が強い装置分野はすべて、液体材料を使う。洗浄・乾燥では洗浄液を、コータ&デベロッパではレジストを、CMPではスラリーを使う。これら3種類のプロセス構築には、装置と液体材料のデリケートな組み合わせが必要である。その組み合わせ技術は、形式知にできない暗黙知的なノウハウが多く、標準化やモジュール化ができないと考えられる。

日本人はこのような分野に特徴的な強みを発揮していると言える。また、標準化やモジュール化が困難なため、他国が追随できないのであろう。

EUV光源開発は日本人に有利

LPP方式のEUV光源開発における第1課題は、Snの液滴をいかに制御するかということである(図2)。

表3 日本が強い装置分野

装置分野	トップメーカー	プロセスの特徴
洗浄・乾燥	大日本スクリーン	カスタム化、装置と洗浄液の組み合わせ、ノウハウの蓄積が必要
コータ&デベロッパ	東京エレクトロン	装置とレジストの組み合わせ、ノウハウの蓄積が必要
CMP	荏原製作所	装置とスラリーの組み合わせ、ノウハウの蓄積が必要

具体的には、Sn液滴の大きさ、形状、落下速度、周波数などのコントロールである。例えば、周波数は100kHzであるという。つまり、1秒間に10万発の液滴を連続的に落下させ、これにCO₂レーザを照射する。

第2の課題は、Snの液滴からいかにプラズマを発生させるかということだ。高出力のEUV光のためには高密度プラズマが必要だが、EUVはプラズマ内でも吸収され減衰する。従って、闇雲に高密度にすれば良いというものではない。もちろん、プラズマ密度が低くても駄目である。

例えば、ギガフォトンの発表では、まずSnの液滴をYAGレーザ(プリパルス)で細かく砕き、そこにCO₂レーザを照射する2段階方式を検討している。一方、Cymerは、昨年のSPIEの発表までは力づくでCO₂レーザを照射していた。今年のSPIEで、はじめてプリパルス方式の結果を発表したが、波長の異なる2つのレーザを使う細かな芸当ではない。

Snの液滴をいかに上手く制御して、いかに上手く高密度プラズマを発生させ、いかにして350~500WのEUV光を得るか? 日本人は、液体材料を用いたデリケートなプロセス開発に、圧倒的な強みを発揮してきた。これが、EUV光源開発は日本人に有利と考える根拠である。

5年後、10年後に、より高機能で快適で安価なPCやスマホを、世界中の人々が買うことができるかは、EUV光源開発の推移にかかっていると言える。是非とも日本人の手で、量産に使えるEUV光源を創造して欲しいと思う。

参考文献

- 1) 湯之上隆: Electronic Journal (2012.2) pp.34-36
- 2) 湯之上隆: Electronic Journal (2012.11) pp.50-53
- 3) 湯之上隆: Electronic Journal (2010.3) pp.41-43