

《 新技術の実用化 》

# 新技術実用化の成否の鍵とは？ EUVLの実用化に不可欠なこと



微細加工研究所 所長 湯之上 隆

新技術が登場した時、多くの場合、専門家たちはその新技術を批判し否定する。その技術が実用化されるか否かはどこで決まるのか。半導体技術の歴史を見ると、その技術が特に微細化に有効な時は、世界中の技術者たちがその技術を使用可能とする解を見つけてきた。一方、既存の競合技術を凌駕できない場合は実用化されない。故にEUVLが実用化されるか否かは、液浸多重露光やEBマルチビームなどの競合技術よりも、微細化およびコスト優位性があるかどうかで決まる。

## EUVLに対する批判

本誌2013年5月号に、EUVL ( Extreme Ultra Violet Lithography ) の実用化の最大の課題は光源の出力であり、「光源さえできれば、EUVLは実現する」という記事を書いた<sup>1)</sup>。

これに対して、マスクの欠陥密度の低減、マスクの重ね合わせ精度の向上、プラズマデブリによるマスクの汚染や損傷対策など、問題は山積しており、例えば光源ができてEUVLは実現しないという批判を受けた。

EUVLの実用化において、光源以外にも問題があるのは事実であろう。それは否定しない。しかし、新技術が登場する時、それが完全無欠な状態で提供されることはあり得ない。装置もプロセスも中途半端な状態で使われ始め、その過程で問題点が明確になり、改良や改善が進んでいく。

EUVLについても、蘭ASMLが2006年に デモツールを米国ニューヨーク州AlbanyのCollege of Nanoscale Science and Engineering ( CNSE ) とベルギーIMECに出荷、2010年に「NXE:3100」を6台出荷、さらに2013年に「NXE:3300B」を11台出荷と、段階を踏んでいる (表1)。

上記EUVL装置の性能は、量産機としては不十分であるが、まずはR&Dに使われ、その後、開発や試作 (の一工程) に使用され、装置やプロセスの改良や改善が進んでいくのではないかと (もちろん、その過程で消滅する可能性もないとは言えない)。

本稿では、新技術が登場した時、その分野の専門家がどのような反応をするか、その新技術が実用化されるのは何故なのか、一方、実用化されな

いのは何故なのかを、半導体技術の歴史から俯瞰する。その上で、EUVLが実用化される場合、どのようなことが鍵となるかを考察する。

## 新技術に対する専門家の反応

半導体は、スケーリング則に従って、ほぼムーアの法則通りに微細化と高集積化を推進してきた。その過程で多くの新技術が提案され、開発されてきた。

注目すべきことは、新技術が登場した際に、多くの場合、専門家たちがその新技術を批判し、否定することである。その結果、消えていった技術もあるが、実用化された技術もある (表2)<sup>2)</sup>。専門家たちがどう否定し、それに対して何故その技術が実用化されたのか？

例えば、不純物を熱拡散でドーブしていた時に、イオン注入技術が登場した。その際、専門家たちはイオン注入によって結晶欠陥ができることから、この技術を否定した。しかし、アニールで欠陥が回復できること、さらに熱拡散よりも制御性が優れていることから、イオン注入技術は定着した。

密着露光で行っていたリソグラフィ技術におい

表1 ASMLによるEUVL装置

年	EUVツール	解像度	目標スループット
2006	ADT	32nm	4WPH
2010	NXE:3100	27nm	60WPH
2012	NXE:3300B	18nm	125WPH

出所：ASMLのHPなどを基に筆者作成

表2 半導体の新技術に関する専門家の反応

新技術	従来技術	専門家の批判	実用化の理由
イオン注入	熱拡散	結晶破壊で不可	制御の正確性
ステッパ	密着露光	低スループットで不可	精度の高さ
ドライエッチ	ウェットエッチ	低スループットで不可	精度の高さ
CMP	ドライ平坦化	汚染で不可	簡便、正確
CMOS	NMOS	低速・大面積で不可	低消費電力
Cu配線	Al配線	汚染で不可	高速性
エキシマ光源	水銀ランプ	超高価で不可	微細化
300mmウェーハ	200mmウェーハ	ウェーハが超高価で不可	デバイス低価格化
液浸リソ	空気中リソ	超高価、揺らぎで不可	微細化
High-kゲート	SiO <sub>2</sub> ゲート	界面劣悪で不可	微細化
Low-k絶縁膜	SiO <sub>2</sub> 絶縁膜	プロセス複雑で不可	高速性
二重露光	単純露光	合わせ余裕なしで不可	微細化
EUVL	ArF液浸	超高価、低スループット	?
450mmウェーハ	300mmウェーハ	超高価、ビジネス性なし	?

出所：元Selete 渡辺久恒氏の早稲田大学ナノテクノロジーフォーラムでの講演資料を基に筆者作成

ては、縮小投影露光によるステッパが登場した。その際、専門家たちは、装置の複雑化、高価格化、スループットの低下を理由に否定したが、微細化に不可欠な装置となった。リソ技術においてはその後、水銀ランプ光源に対してKrFやArFエキシマレーザが登場した際、高価格を理由に否定されたが、微細化推進に欠かせないことにより量産適用された。さらに、液浸および多重露光に対しても、それぞれ、装置価格高騰および合わせ余裕がないことから否定された。しかし、どちらも微細化推進に欠かせないとして、現在量産適用されている。

筆者の専門分野では、ウェットエッチングに対してドライエッチングが登場した。その際、専門家たちはスループットの低下を理由に否定したが、微細化に不可欠として量産適用された。

筆者が実際に技術者だった時に登場したCu/Low-k配線は、Cu汚染により適用は困難と批判された。ウェーハは、手で触れることすらご法度である。人間の汗のNaが汚染源となってトランジスタのしきい値をシフトさせるからである。にもかかわらず、Cu配線形成時には、トランジスタが形成された後のウェーハ上で、絶縁膜中を拡散して汚染源になるCuに、研磨パッドを押し当て圧力をかけてゴリゴリ削るわけである。筆者は、こんな“小汚い”技術は言語道断であると思った。

筆者は1998年に日立製作所のデバイス開発センター（今年閉鎖されたが）で、0.14 μm CMOSへのCuデュアルダマシム配線の開発に関わった。その際、Cuが腐ったり、ビアのCuが収縮して配線不良が起きたり、Cuの中に“す”ができた、不良が多発した。結局、Cuは使わない方がよいという結

論に達して、0.14 μm CMOSへの適用は断念した。しかし、その5年後あたりから実用化され、今やCu/Low-kデュアルダマシム配線は、当たり前のようにロジックLSIに使われている。

以上から、新技術が登場した時、専門家たちはそれを批判する傾向にあることがわかる。しかし、その技術が（特に微細化に）有効である場合は、世界中の技術者たちが寄って集ってその技術を使用可能とする解を見つけてきた。半導体の技術はそのような歴史を歩んできたと言える。

#### 実用化されなかった技術も多い

しかし、すべての技術が実用化されたわけではない。消滅していった技術も多数ある（表3）。その技術は、何故実用化に至らなかったのだろうか？

例えば、リソ分野では、F<sub>2</sub>リソ、X線リソ、高屈折率液浸、EBリソなどが登場した。しかし、これらはどれも実用化に至っていない。F<sub>2</sub>リソは良いペリクル材料が見つからず、レジスト材料も特殊な材料に限られる上、例え頑張っても1世代しか使えないことがわかり、開発は中止された。X線リソは、1:1のマスク開発が難しいこと、解像度的にも数十nm程度であること、強いX線源の開発に金がかかることなどから、今では誰もやらなくなった。高屈折率液浸は、液浸材料やレンズの硝材開発が難しく、1世代しかもたないことから開発は中止となった。EBリソについては、常にスループットが問題だった。ただし、マルチビーム化する方式が現在でも検討されている。

しかし、このような技術的問題よりも、本質的な原因がある。F<sub>2</sub>リソは液浸に負けたとも言える。

表3 実用化されなかった技術とその原因

(出所：東京エレクトロン 有門経敏氏の資料を基に筆者作成)

技術	状況	第1段階の原因	第2段階の原因	最終的な原因
F <sub>2</sub> リソグラフィ	2005年頃開発中止となった	良いベリクル材料やレジスト材料がなかった	1世代しか使えない	液浸リソに負けた
X線リソグラフィ	誰もやらなくなった	1:1のマスク開発が困難だった	X線光源が高価	KrFやArFに負けた
高屈折率液浸	開発中止となった	レンズ硝材の開発に時間がかかる	1世代しか使えない	多重露光に負けた
EBリソグラフィ	研究用として存在する。マルチビームを開発しているベンチャーもある	スループットが今も昔も問題	描画結果の無欠陥の保証が難しい	常に競合するリソ技術に負けてきた
イオンビームエッチング イオンビームデポジション	研究されたが、実用化されなかった	プラズマプロセスに比べて装置が複雑で、コスト高	荷電ビームは発散するため均一性の実現が困難	プラズマ技術に負けた
光励起プロセス	研究がブームになったが、潮を引くように下火になり、やがて消滅した	プラズマプロセスに比べてメリットなし	原理的にエネルギー効率が低い	プラズマ技術に負けた。本来、必要なかった
ドライ現像、ドライ洗浄	研究レベルでは一時注目された	現像では 値が低い。洗浄ではメタルが除去できない	原理的に選択性が出ない。ドライプロセスでは線形現象しか起こらない	競合技術に負けた。本来、必要なかった
選択デポ (SiO <sub>2</sub> , W)	一時実用化されたが、1世代で終わった	望まない場所にもデポしパーティクルの原因になる	選択性は原理的に完璧ではない	ブランケットデポに負けた
FeRAM	製品化されており、300億円程度の市場あり	微細化と高集積化が困難		DRAM, SRAM, フラッシュを代替することができなかった

X線リソはKrFやArFに負けたと言える。高屈折率液浸は多重露光に負けたと言える。EBリソは、まだ負けたと結論するのは早いかもしれないが、現在まで実用化されなかったのは、KrFやArF、液浸、多重露光、すべてに負け続けたからである。

つまり、その技術が何故実用化されなかったかを考えると、テクニカルな問題よりも、競合技術に負けたことが本質的な原因だったと言える。

このような例は枚挙にいとまがない。一時期、イオンビームエッチングやイオンビームデポジションが研究されたが、実用化されなかった。これらは装置が複雑で高価になること、荷電ビームは発散するため均一性の向上が困難だった。しかし、本質的には競合するプラズマ技術に負けた。

光励起プロセスがブームになったことがあった。ダメージレスプロセスとして盛んに研究が行われたが実用化には至らなかった。原理的にエネルギー効率が低いため、スループットに問題があった。しかし、本質的には競合するプラズマ技術がダメージを克服したため、それに勝てなかった。

その他、ドライ現像とドライ洗浄、WやSiO<sub>2</sub>の選択デポなどが検討された。量産適用されたケースもあったが、ある時期から下火になった。本質的な原因は、やはり競合技術に勝てなかったことにある。

FeRAMが、DRAM、SRAM、フラッシュメモリなどをすべて代替できる“ドリームメモリ”として注目された時期があった。ICカードなどに適用され300億円程度の市場にはなったが、残念ながら

ドリームメモリは実現しなかった。技術的には、Pt電極の微細加工が難しく、微細化と集積化が進まなかった。しかし、本質的には、DRAM、SRAM、フラッシュなど既存メモリに負けたと言える。

### EUVLの実用化への鍵とは

このように、ブームになったり長年研究されてきた技術が実用化されない事例を見てみると、テクニカルな問題も存在する。しかし、それより、既存の競合技術を凌駕するメリットが見出せないことが本質的な原因となっていることがわかる。

このような観点から、EUVLの実用化への鍵となることを考察すると、結論は極めて単純である。それは、EUVLが、量産装置をリリースした時点で、競合技術を凌駕するか否かにかかっている。その競合技術とは、第1に現在量産適用されている液浸多重露光であり、第2に検討されているEBマルチビームやナノインプリントである。

また比較のポイントは、半導体の微細化に有利か、コスト優位性があるかどうかであろう。ただし、ここで言うコストとは、単なる装置単価ではなく、その技術を適用した時の製造工程全体であることは言うまでもない。

### 参考文献

- 1) 湯之上隆：Electronic Journal (2013.5) pp.34-37
- 2) 元Selete社長の渡辺久恒氏の早稲田大学ナノテクノロジーフォーラムでの講演資料を基に筆者作成
- 3) 東京エレクトロン 有門経敏氏の資料を基に筆者作成