

3. 特集：ナノテクノロジー／情報通信分野の注目動向

次世代 LSI 用リソグラフィー技術の研究開発動向

情報通信ユニット 小笠原 敦

3.1 緒言

0.1 μm (100nm) 以下の線幅に対応した次世代 LSI 用の EUV (極紫外) Lithography 装置が、4 月 12 日に米 Sandia National Laboratories で初めて公開された。

この装置は DOE (エネルギー省) に所属する国立研究所 (Sandia, Lawrence Berkley, Lawrence Livermore) と Intel, Motorola, AMD, Micron Technology, Infineon Technologies (独), IBM から成るコンソーシアム (EUV LLC) で開発された。

現段階で 0.07 μm (70nm) ルールでの量産を可能とし、また 0.03 μm (30nm) まで将来的には可能となる。具体的には現在 Pentium4 プロセッサで 1.5GHz の動作周波数が、2005～2006 年には 10GHz になると予測されている。

従来 DRAM をテクノロジードライバーとして発展してきた日本の半導体技術は 80 年代、90 年代を通して微細化ではトップを走り続けてきたが、その背景には優秀な光学技術を持つニコン、キャノンが LSI 用のステッパー (回路パターン用の縮小焼付け装置) でトップの座を保ってきたという要因がある。

米国は 90 年代後半に MPU 技術に代表とされる設計技術で半導体シェアにおける世界トップの座を日本より奪還したが、次世代でもその地位を確固たるものとするために製造技術の核となるリソグラフィー技術についてもトップの座を狙う戦略に出ている。

本稿では米国の EUV リソグラフィー技術を分析するとともに、日本の技術開発の方向性について言及する。

3.2 リソグラフィー技術の各国の状況

3.2.1 現在のリソグラフィー技術の状況

80 年代以後半導体製造用ステッパーの市場はニコンとキャノンが各々 40%、30% 前後のシェアを持ち、日本が圧倒的な強さを誇っていた。しかしこの数年来オランダの ASML が Philips やカルツァイスのバックアップのもとに大きく躍進し、2000

年度にはついにニコンを抜いて 40% 超のトップシェアに躍り出た。次世代だけでなく、現行世代においても欧米の攻勢に圧倒されつつある。

現行の光学方式のリソグラフィー技術開発においても、レンズの大口径化、高 NA (開口率) 化で ASML に先行されつつあるが、これはカルツァイスのレンズをショットガラス社が材料技術で支えていることも大きい。レンズ材料の結晶育成技術に光ファイバー作製のノウハウが活かされるなど、従来のカメラ用レンズ製造の延長ではない技術が試みられている。

3.2.2 リソグラフィー技術の流れ

LSI 製造における線幅の縮小に伴って、それに対応するリソグラフィー技術は従来 (図表 1) のように考えられていた。

図表 1 リソグラフィー技術のロードマップ

	方式	波長 (μm)	導入時期 (年)
光学方式	KrF	0.248	現行量産
	ArF	0.193	2000～
	F ₂	0.157	2003～
電子線投影方式	EPL	可変	2006～
極紫外方式	EUV	0.0134	2008～

東北大学 未来科学技術共同研究センター大見研究室 資料より

3.2.3 日本の状況

日本では上記の計画に沿って光学方式では ArF → F₂ と研究開発が行われている。業界トップのニコンは F₂ 方式の開発を進めるとともに、光学方式以後の世代の開発としては IBM と共同で EPL を選択した。

3.2.4 米国の状況

しかし米国では F₂ 方式の開発において、レンズ材料である CaF₂ の大型結晶を商業レベルで製造するのは困難であるという結論を下し、一気に EUV 方式へと方針転換を行った。これは現行方式の延長 (パルス発振) で F₂ 方式のステッ

パーを作製したならば、高いエネルギー密度を低減するために直径 30cm、厚さ 20cm にもおよぶ CaF₂ 結晶のレンズを数十枚も必要とするからである。この大きさでは、結晶の製造歩留まりもかなり低いものと想定され、さらには機械的強度のあまり高くない CaF₂ 結晶では自重変形を生じて実用にならないと判断したのである。

次世代の方式としては EPL も選択肢にあったが、マスク作製の困難さ、スループット比較等により EUV を選択したとされている。また、EUV ではミラー集光を行うが、この開発に偵察衛星用に開発した技術を用いたとの話もあり、軍事技術移転の側面もあったようである。

EPL 開発をニコンと共同で行ってきた IBM もこの 3 月に EUV LLC に参加したことで、米国半導体業界全体の方向性は明確になってきている。

3.2.5 欧州の状況

欧州は、Infineon Technologies (独) の EUV LLC の参加、さらには ASML の EPL 開発からの離脱、EUV LLC への協力と、米国と歩調を合わせつつある。ただし若干米国と異なる点は、ASML - カールツァイス - ショットが F₂ 方式用の CaF₂ 結晶の作製において、NA = 0.9 のレンズを開発する等、F₂ 方式の可能性を捨てていないところにある。旧東欧、ソ連圏の優秀な結晶研究者と技術、最新の光ファイバー技術をベースとした材料技術が米国には無い特徴を出している。

3.3 次世代リソグラフィー技術の方向性

3.3.1 EUV 技術の問題点

前項までに述べたように次世代リソグラフィー技術について EUV を一気に指向した欧米の戦略は固まりつつある。しかし、この EUV 方式が次世代の本命になったわけでは必ずしも無い。それは以下の理由による。

(1) 高エネルギーダメージ

EUV は極短波長 (0.0134 μm) であるため単光子で 92.5eV もの高エネルギーとなる。(図表2)

この表を見てもわかるように、EUV では現行 KrF の 18.5 倍もの高いエネルギーが生じるのである。これは(図表3)に示したレンズ材料、光学材料のバンドギャップをはるかに上回るエネルギーであり、結合に寄与している電子を励起して、材料を破壊してしまう。そのため、反射率の高いミラ

ーで集光するのである。しかしレンズ系はミラーで代替してもマスク面には直接入射されることになる。このマスクには MoSi の多層膜が使われるが高いエネルギーを受けて高熱を発することは容易に想像できる。

そのためマスクや装置を構成する材料の劣化が懸念され、コスト高につながる可能性がある。

図表 2 光子エネルギー

	波長 (μm)	周波数 (PHz)	光子エネルギー	
			eV	対 KrF 比
EUV	0.0134	22.4	92.53	18.506
F ₂	0.157	1.910	7.90	1.580
ArF	0.193	1.553	6.42	1.285
KrF	0.248	1.209	5.00	1.000

東北大学 未来科学技術共同研究センター大見研究室
資料より

図表 3 材料のバンドギャップ

材料	バンドギャップ
CaF ₂	9.41eV
Al ₂ O ₃	8.95eV
SiO ₂	8.95eV

東北大学 未来科学技術共同研究センター大見研究室
資料より

(2) マスク精度

多層構造マスクのためトータルの精度が非常に高く要求され、マスク製造のスループットが向上しない。

(3) EUV 光源からの汚染

金属蒸気が光学系に付着する可能性がある。

3.3.2 F₂ 方式の可能性

米国では切り捨てられてしまった感のある F₂ 方式であるが、現行のパルス方式の光源を連続発振方式にすれば尖塔的なパワーを抑制でき、光学系の負担を軽減してより小型の CaF₂ 結晶で同性能を実現できる。大型の CaF₂ 結晶成長がこの方式の最大の問題点であるので、連続発振の F₂ エキシマレーザが実現されれば最も量産に適したシステムが可能となるのである。NA = 0.9 のレンズを用いて 0.05 μm までの加工が可能である。

3.3.3 電子線方式の可能性

次世代リソグラフィ技術として欧米ともに電子線方式から離脱していつているが、電子線方式には光学方式やEUV方式には無い利点がある。光学方式では微細化に伴い高NAのレンズを使うことになるが、高NAになればなるほど焦点深度が浅くなる。言い換えれば高さ方向に焦点が合う範囲が狭くなる現象が起きてくる。EUVでもウエーハ面上で結像させるため、同様の現象が起きる。

しかし、電子線を直接当てる方法ではこれを避けることができるのである。将来作製されるデバイスが3次元構造をとるようになってきた場合、それに対応できるリソグラフィとしてクローズアップされてくる可能性が高い。

3.4 結言

日本においても欧米と同様にEUVを次世代リソグラフィ技術と考えるならば、かなりハンディを負ったことは否定できない。しかしF₂方式や電子線方式も多く長所、可能性を持っていることから全てを否定的に捉えることも正しくはない。

特に日本は連続発振F₂エキシマレーザ技術の開発では独走的な立場にあり、また電子線応用技術においても最も進んでいる。さらに本稿で触れなかったがX線露光技術も研究が進んでいる。

米国の半導体開発においてはEUV LLCに見られるような産官連携、スタンフォード大学のCIS (Center for Integrated Systems)に見られるような産学連携が有効に機能して次世代LSI開発が進んでいる。

日本でも次世代の主力LSIとは何なのか、(従来からのメモリーのようなコモディティ品なのか多品種少量のシステムLSIなのか)、そして微細化されて行くデバイス形態は何なのか(今後ともプレーナー構造なのか、3次元構造をとるものなのか)を見据えた上で、それに適した次世代の半導体戦略、リソグラフィ戦略を、産官学の連携のもとに行えば十分に勝機はある。

LSI技術は情報・通信技術の根幹であり、社会のあらゆる分野にIT技術が浸透してきている今日日本が経済においても技術においてもトップポジションを維持するためには必ず制さなくてはならない技術なのである。

※ 注目動向

AMSKのSVG社買収で米欧連携強化へ

ブッシュ政権は5月3日にASMLが、カリフォルニアのSVG社を買収するという計画を認可したと発表した。

SVG社は米国EUV LLCでEUV量産機を作製する上で重要な役割を果たしていると見られ、Intelへのステッパーのメインサプライヤーとして知られ、ASMLが買収計画を提出し(2000年10月発表)、米国政府の委員会であるCFIUS(Committee on Foreign Investment in the United States)が3月7日から調査を行っていた。

SVG社は軍との契約があり安全保障の点から反対するのではないかという予測があり、ブッシュ政権の判断の行方が注目されていた。

こうした動きにより半導体分野での米欧連携の強化が現実のものとなりつつある。

* 情報提供

Center for Integrated Systems (CIS),
Stanford University
東北大学工学研究科大見研究室