

《LSIの微細化はどこまで続くのか?》

# LSIの微細化は果たして何nmまで EUVL & ギガファブの時代へ突入



㈱オムニ研究所 オムニTLOイノベーション推進本部 湯之上 隆

微細加工技術は“もう限界だ”という壁に何度となくぶつかってきた。しかし、その都度、半導体技術者達は己の努力により、その壁を乗り越えてきた。その結果、2007年11月には、米Intelが45nmの微細加工技術を用いたプロセッサを発表するに至っている。今までもそうだが、今後の微細加工技術の鍵を握っているのは、リソグラフィ技術であることは言わずと知れた事実である。今回、2007年2月に行われたSPIEで“岡崎コバンザメ作戦”と名付けられたリソ・キーパーソンへのアンケート調査を行い、2007年7月からはリソ・キーパーソンを携えた48日間に及ぶ13か国への自費による世界一周調査旅行を実施した。ここでは、この調査過程で明らかになった“LSIの微細化はどこまで続くのか?”という疑問について論じる。

微細化の限界は何nmか?

1970年、米Intelが1K DRAMと4004プロセッサを発売し、LSI時代の幕が切って落とされた。10 $\mu$ mからスタートした微細加工技術は、何度となく“もう限界だ”という壁に突き当たった。しかし、その都度、歴代の半導体技術者達は、その壁を乗り越えてきた。

そして、2007年11月13日、Intelが、45nmの微細加工技術、ハフニウム・ベースのHigh-k絶縁膜とメタルゲートを使用した新製品「Core2 Extreme」および「Xeonプロセッサ」を発表した。

“ムーアの法則”の提唱者であるGordon Mooreは、これを、「この40年間で、トランジスタにおける最大の進歩」と称した。

果たして、LSIの微細化はどこまで続くのか? その限界は何nmなのだろうか?

微細化の鍵を握るのは、言わずと知れたリソグラフィ技術である。“リソができればLSIが量産できる”と言うわけでは、もちろんない。しかし、リソができなければ何も始まらないのも事実である。

果たして、世界中のリソグラフィ技術者達は、どこまで微細化できると考えているのだろうか?

本稿では、2007年の1年間にわたって、世界のリソグラフィ関係者にヒアリングした結果を紹介する。その結果から、LSIの微細化の限界がどの辺り

になりそうなのかを予測する。

岡崎コバンザメ作戦で第1次調査を実施

まず、2007年2月、ASET（超先端電子技術開発機構）でEUVLのリーダーであった岡崎信次氏（現職 日立製作所 中央研究所）に、世界中のリソ・キーパーソンをリストアップしてもらった。リストには、日米欧アジアの半導体メーカー、装置メーカー、材料メーカー、および大学やコンソーシアムなどに所属する実力者達がラインナップされていた。

次に、2007年2月、米サンフランシスコで開催されたリソグラフィ業界最大の国際会議SPIEにて、上記リソ・キーパーソンへの突撃インタビューを試みた。

講演の休憩中やポスターセッションの際、岡崎氏にぴったり張り付き、岡崎氏に近寄ってくる世界中のリソ・キーパーソンへ、素早くアンケート用紙をわたす“岡崎コバンザメ作戦”を、SPIEの期間中、続行した。

ロジックLSIの限界は何nmか?

その場で回答を得られない場合は、電子メールでアンケート用紙を送付し回答してもらった。2007年5月頃までに回収した結果を以下に紹介する。

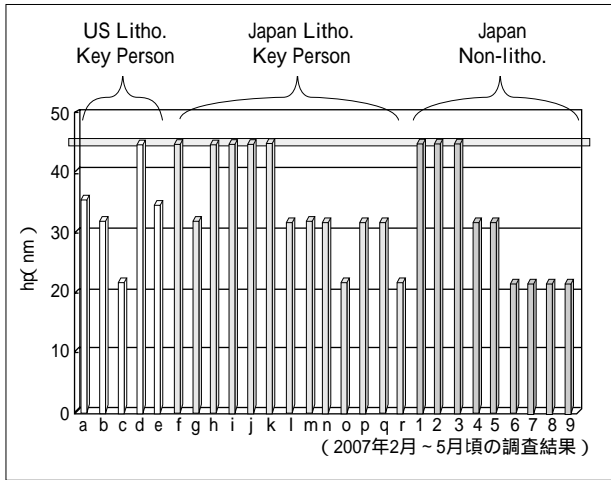


図1 ロジックLSIの限界はどこか?

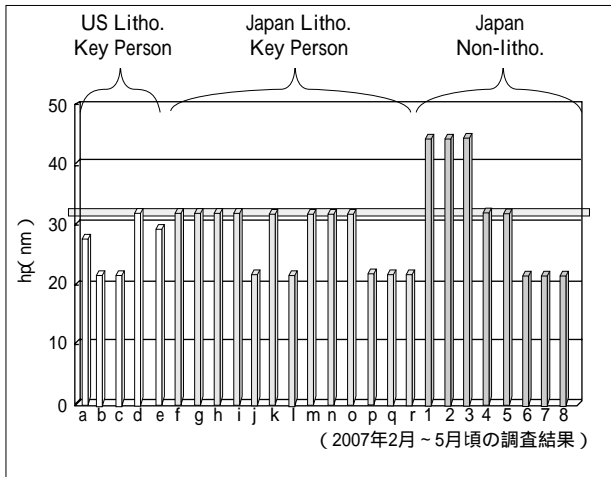


図2 メモリLSIの限界はどこか?

また、セミコンポータルWebサイトにおいても、日本の半導体技術者を対象に、同じアンケートを実施した。その結果も合わせて以下に示す。

図1は、横軸のa、b、c、...が、リストアップされたリソ・キーパーソンを示す。回答者を、米国のリソ・キーパーソン、日本のリソ・キーパーソン、セミコンポータルの回答者（半導体技術者）の3種類に分類した。また、回答者には、「量産可能なLSIの限界をhp (nm)で」答えてもらった。

2007年2～5月時点で、世界のリソ・キーパーソンは、ロジックLSIの限界を、45nm、32nm、最もチャレンジングな回答でも22nmと考えていた。

また、日本人のすべてが、45nm、32nm、22nmと、ITRSのロードマップに記載されている値を回答したのに対して、米国人の中には、36nmや34nmと、ロードマップにない値を答える技術者がいた。

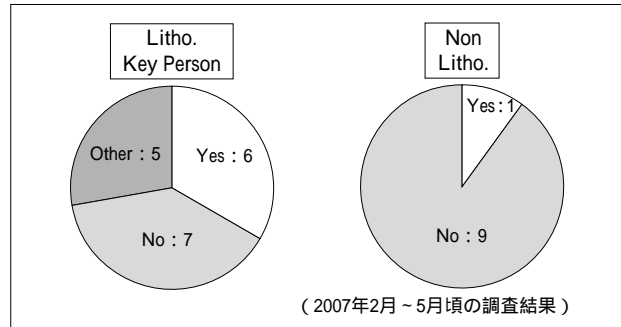


図3 高屈折率液浸の量産適用は不可能でないか?

自分でそろばんをはじいて回答しているようであり、このようなところに、米国人気質が表れているように感じられた。

メモリLSIの限界は何nmか?

2007年2～5月時点で、世界のリソ・キーパーソンは、メモリLSIの限界を32nm～22nmと考えていた。平均的に、ロジックよりメモリの方が、微細化の限界が1世代先にあると思われていたようだ(図2)。

また、ロジックと同様、メモリにおいても米国人の中には、30nmや28nmと、ITRSのロードマップにない値を答える技術者がいた。

この2つの質問について、特筆すべき回答として、「ロジックLSIでhp32nm、メモリLSIでhp22nmの量産技術が、すでに存在する」と断言した技術者がいた。おそらく、ArF&ダブルパターニングの技術をほぼ完成させていたと推測できる。

高屈折率液浸の量産適用は不可能ではないか?

2007年2月、SPIE時点では、ArF液浸の量産適用が秒読み段階に入っていた。次世代の露光装置として、ArF高屈折率液浸が1つの候補になっていた。しかし、その技術開発の状況は悲観的に思えたため、「量産適用は不可能ではないか?」と質問した。その結果、2007年2～5月時点で、世界のリソ・キーパーソンたちの見解は、「Yes(できない)」6人、「No(できる)」7人、「Other(わからない)」5人と割れていた(図3)。

一方、リソ以外の技術者たちは、10人中9人が「No(できる)」と答えた。そのコメントの多くは、「リソ屋は、いつも、できない、できないと大騒ぎをする。しかし、これまでの歴史を見れば明らかのように、いつもできているじゃないか」というものであった。

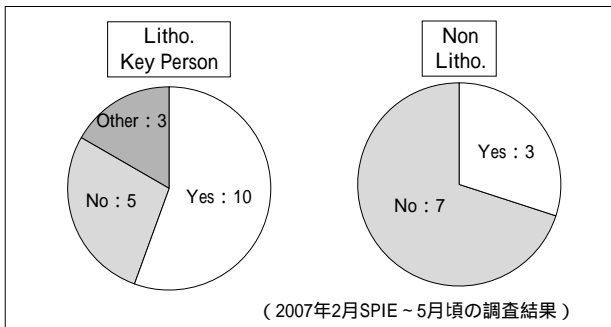


図4 EUVLの量産適用は不可能ではないか?

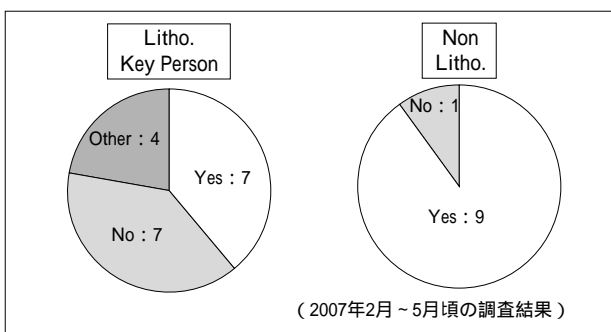


図5 LSI産業は成熟産業になるのか?

### EUVLの量産適用は不可能ではないか?

EUVLの技術開発は、高屈折率液浸以上に困難を極めているように見えた。例えば米AMDのHarry Levinsonが、銀河系のスライドを用いて、「ここに地球がある。EUVLの量産装置は、地球から数十万光年離れた銀河系の隅っこにある」と述べ大爆笑を誘っていた。

それほど、EUVLは、困難であると思われていたのである。従って、アンケートでも「EUVLの量産適用は不可能ではないか？」と問うた(図4)。その結果、2007年2～5月時点で、世界のリソ・キーパーソン達の見解は、“Yes(できない)”10人、“No(できる)”5人、“Other(わからない)”3人と、悲観的な意見が優勢な結果となった。

一方、リソ以外の技術者達は、10人中7人が、“No(できる)”と答えた。

ここでも高屈折率液浸と同様なコメントが寄せられた。「常に、リソ屋は、できない、できないと騒ぐ。リソ屋は心配性過ぎる。」どうやら、業界内では、最先端リソ屋の評判は、芳しくない。

### LSI産業は成熟産業になる?

LSIの微細化が止まり、技術革新がなくなり、例えて言うなら、鉄鋼業のように、成熟産業になる

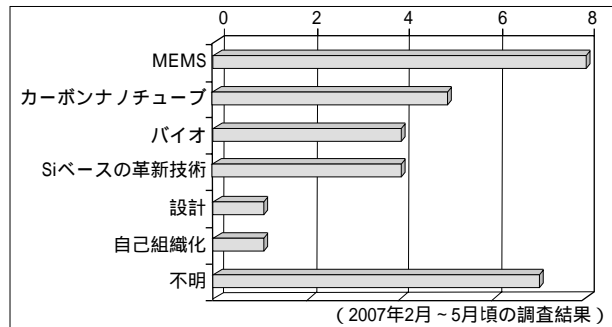


図6 LSIのイノベーションではどの技術が鍵になるか?

のか? と問うてみた(図5)。

その結果、2007年2～5月時点で、世界のリソ・キーパーソン達の見解は、“Yes”7人、“No”7人、“Other”4人と、割れていた。

一方、リソ以外の技術者たちは、10人中9人が、“Yes”と答えた。

この対比は、とても面白い。リソ・キーパーソン達は、高屈折率液浸やEUVLについて悲観的であったにもかかわらず、「LSIは成熟産業になる、つまり、技術革新はなくなる」と言われると、“No!”と反抗する技術者がいるのである。

一方、「高屈折率液浸もEUVLもできるんじゃないの?」と呑気に答えていたリソではない技術者達のほとんどが、「LSIは成熟産業になるんでしょ」と答えている。

この辺りに、リソ屋と、リソ以外の技術者の心理的葛藤(矛盾?)が見え隠れして、大変に面白い結果となった。

### LSIのイノベーションではどの技術が鍵に?

2007年2～5月時点では、MEMSとの融合が8人、カーボンナノチューブの適用が5人、バイオとの融合が4人、何かよくわからないけれどSiベースの革新技術が4人、という結果であった(図6)。

### 世界一周の調査旅行で第2次調査を実施

研究テーマ「LSIの微細化はいつ止まるのか?」と、世界のリソ・キーパーソンのリストを携えて、筆者は、2007年7月16日から、世界一周調査旅行に出発した。

全行程48日間、日本を出発した後、カナダ 米国 ブラジル 欧州 インド 東南アジア 中国 台湾と調査を続け、9月2日に帰国した(図7)。この間、13か国で合計40社を訪問し、ヒアリングを続行した。

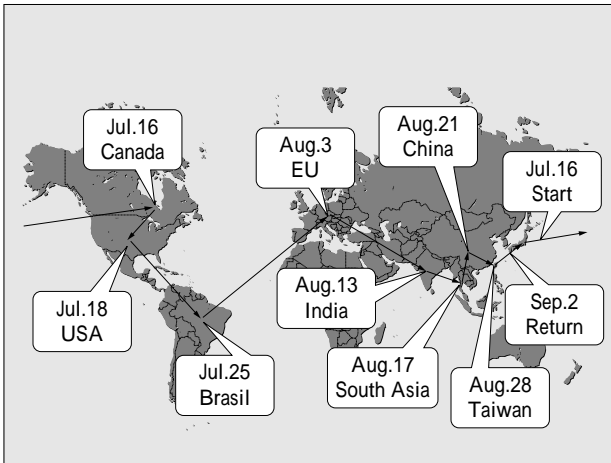


図7 2007年7月16日～9月2日までの世界1周調査旅行

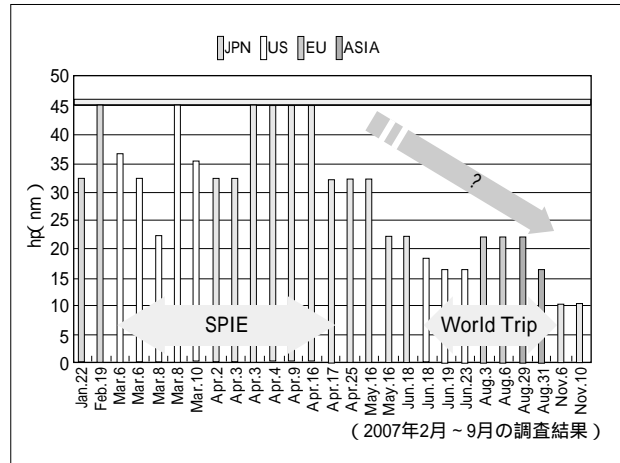


図8 ロジックLSIの限界はどこか？

ロジックLSIの限界は何nmか？

今までの質問について、2007年2月のSPIEから世界一周終了の9月まで、ヒアリングで得た回答を時系列的にグラフ化してみた。横軸は、ある1人のリソ・キーパーソン（一部、デバイス技術者も含まれる）が回答した日付を示す。また、バーは米国人、日本人、欧州人、アジア人で分類している。

2007年2月のSPIE時点に対して、そこから半年経過した2007年7～9月時点では微細化の限界が大きく伸展していることがわかる。ロジックLSIの限界は、2007年2月時点で45nm～32nmだったが、2007年7～9月時点では22nm～10nmになった（図8）。

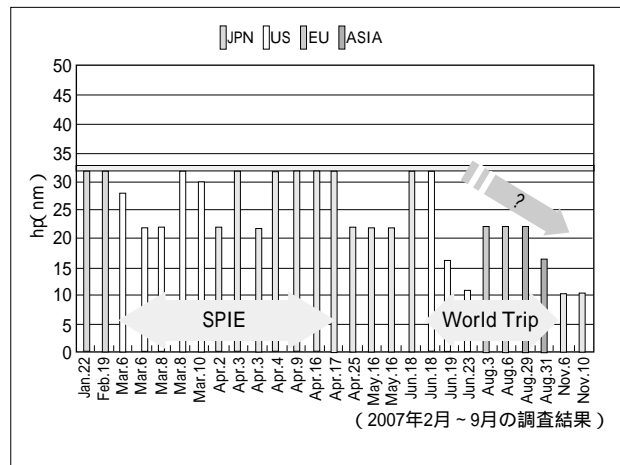


図9 メモリLSIの限界はどこか？

メモリLSIの限界は何nmか？

メモリLSIの限界も同様に、2007年2月のSPIE時点で32nm～22nmだったが、2007年7～9月時点では22nm～10nmになった（図9）。

これら2つの質問に対して、特筆すべき回答としては、ファンドリーの最大手メーカーで、「すでにhp22nmの技術開発は済んでいる。現在hp16nmを開発している。限界はhp10nmぐらいになるのではないか？」と発言した技術者達がいた。また、彼らに第1次調査結果の図1および図2を見せると、「LSIの限界が45nmとか32nmとか、どこの誰がそんな（間抜けな）答えをしているのか？」と大笑いされた。

このコメントからもわかるように、このファンドリーの微細加工技術は、他国および他社と比較しても、非常に進んでいるように感じられた。

また、ファンドリー技術者達の、「22nm～16nmの微細加工技術を開発している」という発言は、意味深長であり、重い。何故なら、彼らファンド

リーは、ファブレスからの依頼がなければ闇雲に微細加工技術を進める必要がないのである。その彼らが、22nmを完了し、今や16nmに取り組んでいるという。つまり、16nmの微細加工を必要とするLSIのビジネスが、すでに存在している可能性があるということだ。

では、彼らファンドリーは、22nm～16nmの微細加工を行うための露光装置としては、何を想定しているのだろうか？

高屈折率液浸の量産適用は？

2007年2月のSPIE時点では、リソ・キーパーソン達の意見は割れていた。そこから半年経過した2007年7～9月時点では、ほとんどの意見がOtherになった（図10）。

具体的には、「技術的にできるかもしれないが、タイミングが間に合わない」、または、「できたと

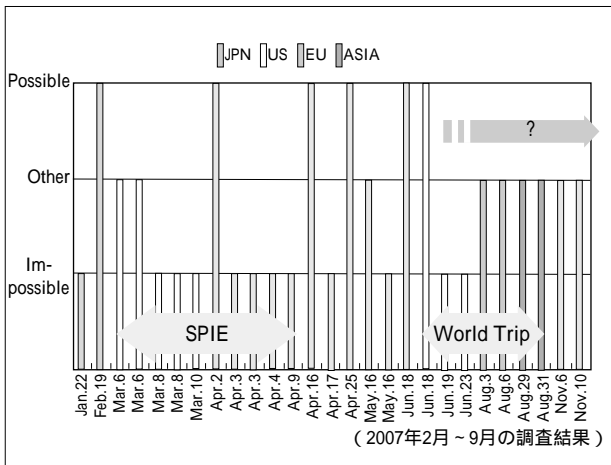


図10 高屈折率液浸の量産適用は可能か？

しても、1世代しか使えない。そんな装置や技術を開発する意味がない」というコメントであった。

### EUVLの量産適用は？

2007年2月のSPIE時点では、リソ・キーパーソン達の意見は悲観的（Impossible）であった。そこから半年経過した2007年7～9月時点では、ほとんどの意見が“できる（Possible）”に変わった（図11）。

図8および図9に示したように、わずか半年間で、ロジックLSIとメモリLSIの限界が進展したのは、EUVLの量産可能性に期待が持てるようになったからだと推測できる。この半年間に何が起きたのか？

前出の岡崎氏によれば、次の3つのトピックスがあったとのことである。

2007年7月、日本で開催されたEUVLの国際シンポジウムで、米Cymerが、LPP（Laser Produced Plasma）方式の光源で実用化レベルに近い100Wの出力を達成した<sup>注1</sup>。

AMDが、米AlbanyのCNSE（College of Nanoscale Science and Engineering）に設置してある蘭ASMLのEUVL露光装置（ADT：アルファ・デモツール）を使って、LSIの試作に成功した<sup>注2</sup>。

日本のコンソーシアム・半導体先端テクノロジーズ（Selete）が、ニコンのEUVL露光装置「EUV1」を使って、hp30nmのパターンを実現した。

これらのトピックスから、EUVLの量産適用に対する期待感が膨らみ、微細化の限界が一挙に進展した。

その結果、世界のリソ・キーパーソン達の集合

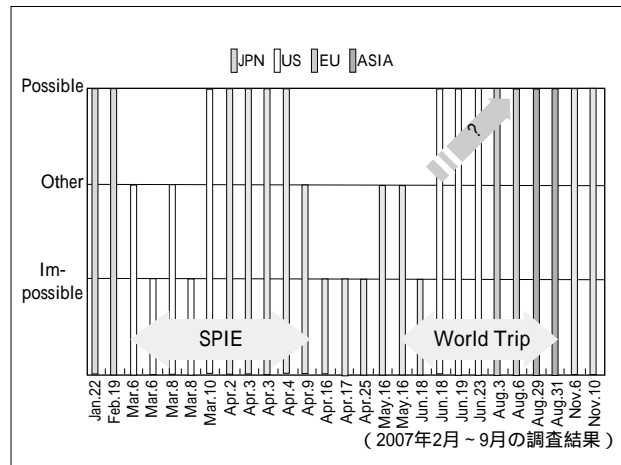


図11 EUVLの量産適用は可能か？

意識が、EUVLの性能限界まで（hp10nm辺りか？）微細化できるというものに変化しつつある。

### 経済的な限界は？

技術的なブレークスルーが連続的に発表されるようになり、明るい展望が見えてきたEUVLであるが、経済的な問題が存在する。

EUVLの量産機が実現できたとしても、その価格は100億円近くなると噂されている。果たして、100億円の露光装置をずらりと並べたLSI工場で、ビジネスの採算が合うのだろうか？ 技術的に可能になったが、価格が高過ぎて使えない、つまり、経済的な問題が微細化の限界を決定することにはならないのだろうか？

この問題の答えの1つは、前出の世界最大手のファンドリーの技術者が示してくれた。

「EUVLが1台100億円？ 問題ない。その答えはギガファブだよ。月産数十万枚のギガファブならば、1台100億円のEUVLであっても、ノープロブレムだよ。」

かくして、世界の半導体産業は、EUVL&ギガファブの時代に突入するのであろうか？ 日本半導体産業はどう対応するのか？ 今後も、微細化の行方から目が離せない。

注1：実際には、Cymerのデータは、バーストモードと呼ばれる短時間（1ms）の結果であった。運転時間に占める発光時間の割合はわずか5%であり、従って、平均出力に換算すると5Wにしかならなかった。しかし、それでも大きな進展であった。

注2：45nmで設計されたLSIのメタル第1層（M1）をEUVLで露光しただけであるが、“実際に使った”ことが大きなインパクトとなった。