

## 半導体産業再生への処方箋

A Prescription for Revitalizing  
the Semiconductor Industry

奥村勝弥

Katsuya Okumura, Prof. Dr.

東京大学先端科学技術研究センター  
教授，工学博士



今、半導体産業が大きな転換期を迎えている。本稿では半導体業界が抱える問題点を洗い出し、解決策を提案する。低迷の原因はパソコン市場の頭打ちであり、微細化技術の限界である。これらの問題をクリアし半導体産業を再生する処方箋として、アジャイルなミニ・ファブ、マスクレスの直接描画、三次元(3D)LSIなどの技術開発を提案する。

Today, the semiconductor industry is in a period of transition. In this article, we take a close look at the problems facing the semiconductor industry, and at proposals for resolving these problems. Two factors causing the stagnation of the semiconductor industry are that personal computer market growth has passed its peak, and that there are limitations to miniaturization technologies. As a prescription for resolving these problems and revitalizing the semiconductor industry, we herein propose the development of technologies such as agile mini-fabrication, mask-less EB direct drawing, and three-dimensional LSI.

### 1

#### はじめに

半導体産業が生まれて、ほぼ半世紀が経過した。この間、順調に拡大成長を続け、30兆円の市場にまで育った。しかし、ここ数年LSIメーカー(特に日本メーカー)の先行き不安が大きくなってきている。

第一の原因は損益の振幅が大きすぎることである。成長産業では多かれ少なかれ振幅が大きいものではあるが、最近はその数千億円単位となっており、キャッシュフロー経営を考慮すると大きな問題である。

第二はエンドユーザ産業の成長鈍化の問題である。従来、コンピュータが半導体産業のけん引車であり、その後はパーソナル・コンピュータに引き継がれて現在に至っている。このパソコン産業に成長の陰りが見られ、今後順調に更に成長していくとは考えにくい状況である。これはパソコン産業に新たな用途開拓が見つけられないからである。この影響をもるに半導体産業も被っている。

第三は微細化技術の大きな壁に立ち向かっていることである。半導体産業は図1に見るようにここ30年以上微細化技術を開発し、LSIの性能向上とコスト低減を同時に果たしてきた。しかし、100nmの時代を迎え、技術的と経済的

の両面から問題点が顕在化してきた。

以上の問題点をもう少し詳細に論じ、それからこれを解決するための処方箋について論じてみる。そして、21世紀にも半導体産業が更に成長し、この産業から派生してきているナノテク産業やマイクロマシン産業へとスムーズに技術移転が行われるようにしていきたい。

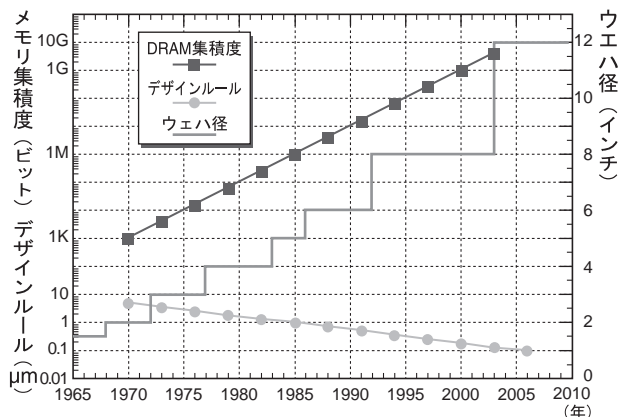


図1 微細化の推移

## 2

## パソコンの限界

パソコンは現在年間1億台以上も生産されている。かつては二桁の成長率を誇っていたが、最近では成長率も利益率も低下し、今後大きな成長が見込めなくなってきたと言われている。ここまで大きく成長してきた最大の理由は、インテル/マイクロソフトのデファクト化が進み、汎用化してコスト削減に大きく寄与してきたからだと考えられる。

しかし、汎用化が進みすぎてしまい、どこのメーカーのパソコンでも差異がなく、個性がなくなってしまった。このため新たなアプリケーションが見つからず、おもしろくなくなってしまったのが低成長の原因の一つである。

パソコンの性能は微細化によって大きく改善され、2GHzを超える機能になってきている。しかしこの高性能が必要なアプリケーションがパソコンレベルでは見つからないことが第二の原因である。

このパソコンの次に来るものとして期待されているものが情報家電と言われているものである。これはゲーム機が最初のはしりであり、続くものとして携帯電話、デジタルカメラ、DVD、カーナビ等々がある。これらはいずれも“アミューズメント”“ファッションブル”といったことがキーワードとなる機器で、日本が独占的にリードしている。これらの機器は別の言い方をすると動画とモバイル性である。個性的であることが大事であり、ブームになりやすいものである。

情報家電用のLSIとパソコン用のものとは、その性格は大きく異なっている。表1にこれらの対比を示した。

	今まで	これから
主たる用途	パソコン	情報家電
デバイス	汎用メモリ	SOC(カスタムLSI)
生産数量	10億個/年	10万個/機種
製品寿命	2~3年	数ヶ月
工場	コスト優先	コストとQTA T

表1 半導体産業の姿

パソコン用LSIは心臓部のMPUはインテルの独占であり、多くのLSIメーカーはメモリの供給者になっている。1台のパソコンで10個以上のメモリを使用するため、年間10億個以上の汎用品メモリの消費がある。しかもその製品寿命は2~3年と比較的長い。

これに対し、情報家電では、個性化を狙うため、カスタムLSIが不可欠である。一つの開発機種ごとに専用LSIが必要であるが、その個数は高々数千から10万個である。マーケットの反応がよければすばやく立ち上げる。しかしその機種の寿命は長くても数ヶ月と短い。

このように両者の差異は非常に大きい。デバイス設計・製造両面からの大きな変革が不可欠である。

## 3

## 微細化の限界

現在130nmの微細化技術は実用化レベルにあり、100nm以下のプロセスが研究・開発されている。ここで微細化の大きな壁が顕在化してきた。第一の壁はリソグラフィ技術の壁、第二は微細化トランジスタ及び微細配線技術の壁である。

リソグラフィ技術は水銀ランプ光源からエキシマ・レーザー光源へと短波長化することで進化してきた。レーザー光源になることにより、露光機のコストやランニングコストも数倍から10倍近くにまで大幅に上昇し、100nm以降の光露光を考えると更に数倍のコストアップと言われている。

マスクを用いた縮小露光法が現在採用されているが、露光波長の半分ぐらいのパターンを転写させるために、非常に高度な光学技術を利用している。このためマスクに種々の細工を施しており、マスクコストも非常に高価で、数百万円にもなっている。近い将来、1000万円でも困難になると予想されている。このようなマスクがLSI製造のためには10枚程度必要となる。

一組のマスクセットで汎用品DRAMのように数億個のLSIを製造するのであれば、このマスクコストでもなんとか回収できるのであるが、数万個しか製造しないカスタムLSIでは回収は全く不可能である。

このようにリソグラフィ技術ではコスト的な大きい壁がある。

トランジスタの寸法(面積)を微細化していく時、スケールリング則という物理法則に従って、PN接合深さやゲート酸化膜厚も薄くしていく必要がある。

現状のトランジスタでもゲート膜が薄くなり、シリコン酸化膜のみではリーク電流が問題となりシリコン窒化膜との複合膜になっているが、微細トランジスタでは新たな材料のゲート膜開発が必要となる。更にはソース・ドレインのシート抵抗増大を抑制することも必要となってきている。

微細化の結果、現在のLSIには数千万から数億個の素子が形成されており、これらの素子間を信号が行き交うため、配線の総延長は膨大なものになっている。これに対処するため、配線幅及び間隔も微細化されているが、配線幅の減少でシート抵抗が高くなり、配線間隔の狭隘化で浮遊容量の増大も発生する。

この問題を解決するため、Al配線をCu配線にすることで、抵抗増大を抑制し、かつ誘電率の低い絶縁材料を導入することで容量低下が図られている。しかし、それでも不十分で配線層数の増加という手段も同時に行われている。

従来は単に微細化技術の開発のみでこと足りていたのが、100nm近傍まで微細化されてくると、このようにトランジスタや多層配線の構成材料の変更や新たなプロセスの追加が必要となり、そのコストは膨大なものになる。

以上、問題点を論じてきたが、これからはその解決策について述べていきたい。

## 4

## アジャイルなミニ・ファブ

前述したように、半導体産業のけん引車がパソコンから情報家電に変わっていくと考えられる。この時、LSIメーカーの製造・供給体制に大きな変更が要求されるようになってきている。すなわち、従来のような大量生産体制から少量・多品種のLSIを超変動生産で供給することを要請されてきている。更に、このような情報家電マーケットは変動が激しく、在庫不良を軽減するために、超短納期(QTAT)が強く要望されている。

このような性格を持ったLSI製造を従来型の量産工場で運営していくことは非常に困難であり、これがLSIメーカーの足を大きく引っ張っているのが現状である。これを解決する一つの手法が、ミニ・ファブの提案である<sup>[1]</sup>。

従来の量産工場(メガ・ファブ)では、月産1000ロット(25000枚ウエハ)の生産能力を持つのが標準であるが、これを100ロットと10分の1の生産規模に縮小した工場(ミニ・ファブ)で運営しようとするものである。

メガ・ファブ用装置は専用機化され、平均500ロットの処理能力を有し、高効率に稼働することを目標に開発されてきている。このような装置をミニ・ファブに導入すると効率が非常に低下する。

そこで考案されたミニ・ファブ用の装置は、1台で各種のプロセスに対応できるように改造されているものである。すなわち、多機能化・共用化がキーワードである。

このような装置を導入することにより、表2に示すように、メガ・ファブとほぼ同じ投資効率で工場運営が可能となる。

	メガ・ファブ型		ミニ・ファブ型
ライン規模(Lots/Month)	1000	100	100
リソグラフィ	38	5	4
洗浄装置	76	20	6
拡散(RTP含む)装置	38	7	4
減圧CVD装置	9	4	3
プラズマCVD(塗布)装置	45	6	3
スパッター(メッキ)装置	48	7	3
RIE(アッシャー含む)装置	56	12	6
イオン注入装置	18	3	2
CMP	65	9	4
合計	393	73	35

表2 装置台数比較

ミニ・ファブ内では装置台数及び仕上がりロット数がメガ・ファブに比べ桁以上減少するため、コンピュータによるロット進捗をリアルタイムで完璧に行うことが現実のものとなった。このことにより、納期が半以下になり、超変動生産でも工場運営に何の支障も生じなくなる。このようなファブ運営をアジャイル・ファブと言っている。

このようなアジャイル・ファブでは投資額が100億円以下となり、キャッシュフローを考慮しても俊敏な投資が可能となる。更に少量・多品種でかつ超変動生産とQTATの達成も可能な工場運営が実現できることとなる。

## 5

## マスクレス直接描画

情報家電用LSIのリソグラフィを考えた場合、マスクを用いない直接描画が最も適している。しかし、現実には、スループットが1枚あたり3時間とあまりにも小さすぎ、工場導入は不可能であった。最近、新しい手法が提案されてきている<sup>[2]</sup>。それは、描画時の加速電圧を10分の1にまで下げることにより、レジスト感度を10倍増大させ、スループットを改善するものである。

更に描画方式にも工夫をこらすことが可能であることも判明してきた。

情報家電用のカスタムLSIは、論理回路部とメモリ部から構成されている。論理回路部は、あらかじめ決められたスタンダードセルSCという基本単位の機能ブロックの組み合わせで設計されている。このSCをアパーチャマスクとして製作し、これを用いて描画していくことにより、描画時間の大幅な短縮が可能となってきた。この手法はキャラクター・プロジェクション(CP)方式と言われることが多い。これに対し、各種の矩形パターンを2枚のアパーチャを用いて生成しながら描画していく手法をVSB方式と言っている。

CP方式では、アパーチャマスクを製作するが、このマスクは繰り返し使用されるため、マスクコストはわずかなものとなり、事実上マスクレス描画と言ってもよい。メモリ部は同一パターンで構成されているため、CP方式は更に効率的に利用できる。

前述のSCの数を数百個から百個程度に制限して設計することも可能で、このように数の少ないSCで設計されたLSIであれば更に描画時間の短縮が可能となる。これらのスループットの結果を表3に示した。スループットが10分を切るレベルにまでなってくると、工場導入が可能となり、カスタム品のマスクコスト高騰から逃れることができる。

加速電圧	描画方式	ショット数 (Gショット/枚)	処理時間 (分/枚)
50KeV	VS B	10	177
5KeV	VS B	10	53
	C P+ VS B	2.3	14
	C P+ VS B コンパクト設計	1	8

@130nm ノードデバイス 全レイヤー平均 200mm

表3 直描機スループット比較表

6

三次元(3D)LSI

今までのLSIは二次元の平面上で微細化することで進化してきた。LSIの厚みは数百ミクロンと厚いが実際に素子として機能している厚みはわずか数ミクロンであり、大部分の厚みは基板としての機械的な役割を果たしているにすぎない。そこでLSIの厚みを数10μmまで薄くして、これを三次元的に積み上げていくことで高集積化を達成し、微細化のスピードを鈍化させてもシステムの性能向上を図るといった考え方がある<sup>[3]</sup>。

このようなLSIは三次元(3D)LSIと言われており、図2に示した。この三次元(3D)LSIを実現させるためには、数10um厚のチップを貫通する数万個にも及ぶ多数の貫通ビアが不可欠であり、これを低コストで形成する技術やこのビアを接続していく技術等の新しい技術開発が必要となっている。これらの技術は一種のマイクロマシン加工技術である。

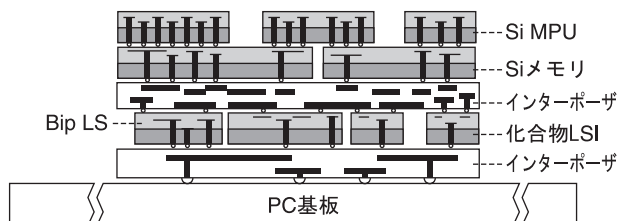


図2 三次元(3D)LSI

三次元(3D)LSIが可能となるとカスタムLSIの考え方も変わる。つまり汎用品に近いCPUチップや汎用品であるメモリチップを三次元に実装していくことでカスタムLSIと同じ機能を低コストの汎用品デバイスで実現できるからである。更には、多層配線だけを果たすチップ(インターポーダ)を導入してくることで、配線遅延の問題も軽減されることも考えられる。

将来的には、Siチップ以外に化合物半導体の積層も可能になれば、非常に多機能なシステム提供が実現できることとなる。

7

おわりに

半導体産業が大きな転換期を迎え、数多くの困難が競合するかに出現してきて、これが現在、半導体メーカーを苦しめている。これらの問題点の原因について論じ、その解決策について提案した。これらをまとめると表4のようになる。

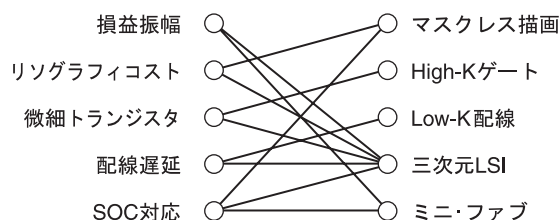


表4 問題解決へのアプローチ

スループットの大幅な増加が見込めるマスクレスの直接描画技術の開発を行うことで、リソグラフィコストの高騰及びSOC(System On a Chip)対応のマスクコストやQTATの解決になる。

多機能化・共用化が可能な製造装置を工場に導入することで、100ロット生産で100億円という投資効率的にも勝れたミニ・ファブ工場が可能である。これをコンピュータ管理(CIM)で効率よく運営することで、少量・多品種のLSIを超変動生産でもQTATにかつ安価に製造できることを示した。

更にマイクロマシン技術及び高密度実装技術をベースに進化させることにより、三次元(3D)LSIが可能であると述べた。この三次元(3D)LSI技術が完成すると、現在抱えている問題を基本的にすべて解決する可能性を持っている。この技術の最大のネックはコストである。このコストをいかにして抑制しながら達成していくかがポイントである。しかし、完成した暁には他産業への波及効果は大きい。現在筆者はこの分野に最大の注力をしている。

参考文献

[1] 日経マイクロデバイス 2001年11月号 No.197 P.117  
 [2] 日経マイクロデバイス 2002年3月号 No.201 P.56  
 [3] 日経エレクトロニクス 2002年2月11日号 No.815 P.105