

2000年を迎えようとしている現在、シリコン半導体技術が進んできた微細化路線が今後も進み、更にそれを研究開発していくうえで、どこに焦点を当てていかななくてはならないのかということは極めて重要な課題である。技術の程度が変化している以上、基盤技術の進め方も変更しなくてはならないし、デバイスメーカーが真にやっていかななくてはならないことに特化していく必要がある。

一方、ディスクリート半導体デバイスに関しては、シリコン半導体技術に立脚してきたパワーデバイス、また GaAs などの化合物半導体技術が牽引(けんいん)してきた高周波電子デバイスや光半導体デバイスが、それぞれ着実に基本素子性能を向上させている。しかしながら最近では、最終的な応用製品/システムでの高機能化、高信頼性化、低コスト化を背景に、システムインテグレーションの概念がますます重要になってきている。

今後は、要素技術レベルでの新しい融合、これはまさに要素レベルでのシステム化であり、単純化した要素を機能化した要素に変えていくのが一つの方向と思われる。

It is a major concern that only a short time remains before the actual arrival of the year 2000 issue for computers. Another important issue is to consider what subjects should be focused on in the field of silicon microelectronics, when further progress must still be made in pushing the frontier of miniaturization forward. The fact that levels of technology have dramatically changed will ensure that research efforts follow the appropriate path. It is necessary to focus on specific research subjects that only device manufacturing companies can undertake.

At the same time, steady progress has also been made in the fundamental characteristics of discrete semiconductor devices such as power devices, high-frequency devices, and optical devices. However, in light of the need for greater functionality and reliability as well as lower cost, the concept of system integration has now become increasingly important. Furthermore, a new kind of synthesis in which elemental devices are merged at the unit level for a system element over the framework of a Si system LSI represents another direction that should be followed.

半導体デバイスの発展の方向

先端半導体デバイスと言ったときに、いわゆるシリコン ULSI 技術と化合物半導体を中心にしたディスクリート半導体技術とがある。前者は集積化によってその機能を高度化し、後者はその多様性によって応用の場を広げてきた。

ここでは、シリコン技術に対しては System on a Chip (SoC) 技術を支える基本要素技術に重点を置き、後者については今後のシステムモジュール化の展開について述べる。

SoC 技術における要素技術としては、設計技術と広い意味でのデバイス技術の二つの柱がある。設計技術

については、最近特にその必要性がよく議論される。

一方、デバイス技術については従来から当然と考えられ、今後も当然と考えられている微細化に伴う問題がからんでいる。微細化プロセスの追求は投資効率が極めて悪いと議論されることもある。ここで微細化技術の歩みを止めてしまえという議論であるならば、現状のデバイス、プロセス技術を維持するための研究だけを残し、必要な最小限の研究は大学に研究委託せよということになる。

しかしながら、SoC 技術の根底には更なる要素技術の進展が暗黙に仮定されている。それが、まさにロー

ドマップとして表れている。われわれがまず考えていくべきことは、どの部分を他の専門メーカーに技術開発を任せ、どの基盤技術を大学に研究を委託し、どの部分をデバイスメーカー自身として必ずやっていかななくてはならないかということを経験することであろう。そして、このことは設計技術にも当てはまる。このようにして、その研ぎ澄まされたターゲットに向かって、高度に研究開発を行うことが今後の半導体産業の進展に求められている。

一方、ディスクリート半導体デバイスはその種類も多く、応用製品や最終システムの中では目立たないことが多いが、実は常に新しい概念・

原理、新構造、新技術を取り込みながら社会のニーズにこたえるべく力強く発展し続けている分野である。高周波素子、光素子そしてパワー素子に代表されるディスクリート半導体デバイスの発展は新原理探索、新構造設計技術開発、デバイス作成プロセス開発、そしてエピタキシャル結晶成長技術など半導体薄膜成長技術開発が牽引してきた。

今後も、この牽引力は極めて本質的であるが、同時にIT(Information Technology)&システムとのかかわりがますます重要になってくる。

シリコン デバイス技術の歴史を振り返る

半導体、特にMOS(Metal Oxide Semiconductor) LSIのデバイス技術

の開発を振り返ると、1960年ころのMOSそのものの製造開発指針、70年代初めのデバイスプロセスの微細化指針、80年ころの信頼性、集積化の問題と対策と進んできた。90年に入り、微細化による高性能化死守のための大掛かりな研究の時代に入り、研究が巨大化してきた(囲み記事参照)。その結果、デバイス要素技術自体の研究が即効性を求めれば求めるほど重くなってきている。

このような状況のなかで2000年に入ろうとしている現在、半導体技術として何を先取りして先端技術をやっていくべきなのであろうか。多くの固体物理における基礎研究が、その根に半導体素子の微細化、それによる限界、それに対するブレークスルーの必要性を述べ、こういうわけでのこの研究は必要である、と述べる。

しかし、限界と簡単に言ってしまうほど現在の半導体技術は極められているであろうか。この部分は技術の原点であり、また、半導体技術で限界になるほとんどのことが、新しい動作原理をもってきても、それだけでは半導体以前に限界になってしまわないであろうか。今こそデバイス要素技術に対する深い理解が必要である。

スケールリング則、ムーアの法則、ロードマップ

いわゆるロードマップという言葉が登場する以前から、スケールリング則、ムーアの法則と呼ばれる、この線上へ行けという道を示されて動いてきたのがシリコンLSI技術の進展であったと言える。

MOSFET技術の開発の経緯

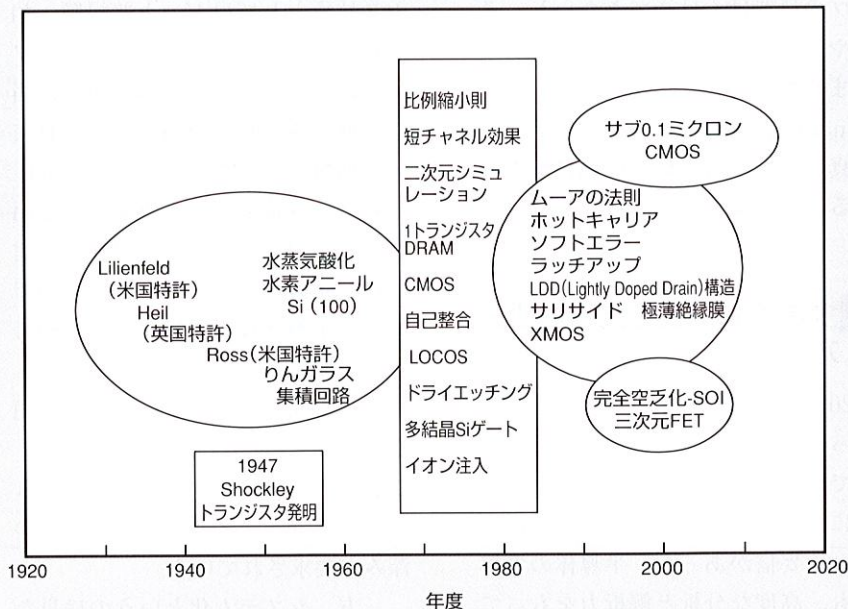
シリコンLSI技術の進展は物語としても大変興味ある題材を多く含むが、技術的にも大きなうねりが見える。

1947年の米国ベル研究所での点接触型トランジスタの発明以前に、ほぼMOSFETの原形と見なすことができる特許が出されている。

60年初頭には、ほぼMOSの基本技術が確立されたと言える。また、これを使った集積回路という概念がテキサスインスツルメンツ(TI)社のキルビーによって出てくる。

70年頃には短チャネル効果、スケールリング則といった微細化指針を与えるものが登場する一方で、1トランジスタDRAM(1トランジスター1キャパシタセル構造のDRAM)、CMOS技術といった現在主流の技術が登場する。それに呼応してか、これができるからか、自己整合技術、選択酸化(LOCOS)素子分離、ドライエッチング、イオン注入という現在主流のほとんどのプロセス技術が登場する。

更に80年に入ると、ホットキャリ



ア、ソフトエラーといった極めて半導体物理の本質に触れるような問題が登場する一方で、ムーアの法則のような技術とは切り離れた半導体の戦略に基づく技術論が展開され始めた。

90年代になって、以前の先人達の知恵をかなり使いきって、とうとう原子レベルという言葉に近づきつつある。さてこれからは。

スケーリング則は技術論であり、これがデバイスの微細化を促した第一原理という点において集積回路発明に匹敵するものと言える。ムーアの法則はトレンドであり、これによって三年で世代の更新が定着した。それは技術の発展にとって決して障害ではなく良い方向に働いてきたと言える。いくつかのオプションはあり、また、進むべき方向は示されていたという意味において、研究の方向という観点では迷わずに進むことができた道である。

しかしながら、ロードマップは“こうあるべき論”である。ここへ来て、これは一体誰のための、何を目的としたあるべき論であり、どうあるべき社会なのかと考えざるをえない。また、そこに解があるかどうかというよりも、そのオプションがまったく見えないし、本当にこれがあるべき形なのかさえも定かでない。

この状態でやみくもに研究のターゲットを広げ、網をひろげておくタイプの研究はもはやできないし、そうやったとしてもほとんどが外れてしまうであろう。だからと言って、something new ねらいだけの研究では真に要求されている問題に解を与えることにはならないであろう。

■ 今後のLSI要素技術の研究方向

20世紀の科学技術は分析の時代であったと思われる。最小単位のところどころでどんな力が働いているかを明らかにすれば、すべての世界がわかるという妄信があった。半導体の世界でも、高度な分析と解析力をもって素過程が明らかになればすべてがわかるという暗黙の了解があった。しかし、今後もこのやり方で進んでいけば、ブレークスルーが生まれ、問題が打開できるであろうか。

半導体技術が今世紀の科学技術、

特に物理学の発展の上に乗っていることはまちがいないが、実は基礎科学との産業技術とのギャップはまだ大きい。そこで、そのギャップを埋(う)めるために先に述べた徹底した要素技術研究は必要である。その中でデバイスメーカーがやるべき課題は、デバイスで問題になるであろうことの先取りと、その問題に関する深い理解に基づく研究開発効率を向上することだろう。この深みという部分が研究の面白さの一面であり、そこから原理的に解決策を発することが企業における要素技術研究のターゲットであろう。

しかしながら、すべての問題を研究対象にはできない。先に述べたように研ぎ澄まされたターゲットを選択して、高度の研究を産学の持ち味を生かしながら進めていくしかない。この特集で論じられている題材は、シリコンLSI関連の要素として、以下の三点に焦点を当てている。

デバイス技術としてはSOI(Silicon On Insulator)デバイス、要素プロセス技術としてはゲート絶縁膜、加工技術としてはマスク用リソグラフィ技術である。これらは現在、当社の研究所で焦点を当てて行われている研究の一端である。これらは、それぞれ今後もっとも重要である超低消費電力技術、極薄絶縁膜の高信頼性、超微細加工に対応するものであり、半導体技術の展開がどう動こうが重要な問題であり、デバイスメーカーが先端をきっていないと問題が見えてこない技術である。また、これらの技術にはすぐには制御しきれない部分が含まれており、研究の深みが要求されている。

一方、システム化というのは単なる寄せ集めではなく、融合から何らかの新規性を創出する方向であるが、このことは要素技術においても重要な方向であると思われる。これについては、もう一度最後に述べることにするが、これは要素技術の深

耕というタイプの研究ではなく、創出するタイプの研究になる。なお今回はもう一つの重要な研究アイテムである設計技術に関してはあえて触れていない。

■ ディスクリート半導体デバイス技術

近年、花開いている高度情報社会を支えているシステムにおいては、幹線光通信用の半導体レーザ、光変調器、光受信器、また、携帯端末用の高周波化合物半導体デバイスなどがキーデバイスである。

一方、エネルギー変換や省エネルギー問題に関連するシステム分野では、産業用インバータのパワーデバイスがシステム性能を決める重要なキーデバイスとなっている。このような状況を改めてディスクリート半導体デバイスの立場から見ると、デバイス性能を一様に上げるだけでは不十分で、システムに応用された状況をあらかじめ想定して、戦略的なデバイス仕様を柔軟に設定する必要がある。

このような背景を踏まえながら、ディスクリート半導体デバイスの代表格である高周波デバイス、光デバイスそしてパワーデバイスについて、今後の動向・トレンドを次に概観してみる。

■ 高周波デバイスと光デバイス

歴史的に見ると化合物半導体を基盤材料として発展してきている。高周波デバイスはこれまではGaAs系を軸にして、最近では、大電力応用としてSiCやGaNも注目されている。しかし、なんと言っても、研究開発されてきた化合物半導体の多様さは、可視発光素子の60年代からの歴史を概観することにより理解できる。GaAs pn接合レーザ、GaP赤色LED(発光ダイオード)、GaP緑色LED、GaAlAs系DH(Double Het-

ero) レーザ, InGaAlP系赤色レーザ, InGaAlP系橙色LED, ZnSe系青緑色レーザ, そして最近ではGaN系青色LED, GaN系青紫色レーザの研究開発が注目されている。

その足跡は単なる材料開発にとどまらず, ヘテロ接合, MQW(多重量子井戸) など多彩な構造を積極的にデバイス内部に取り込みながら, また, 薄膜結晶成長技術を軸にした材料開発とデバイス構造設計とが一体化・融合して発展を続けている。

このように, 多彩に発展してきた高周波デバイスと光デバイスではあるが, これまでの研究開発目標の主たる軸足は, 高周波デバイスでは出力パワー, 周波数特性, 低消費電力, また, 光デバイスでは波長領域の拡大, 発光効率/出力パワーの向上, 信頼性などであった。

今後の傾向としては, 高周波デバイスでは能動素子と受動素子の一体化など, また, 光デバイスではビームの面からの出射, 発光効率の飛躍的改善, そして新機能の実現である。光ビームの面方向からの出射に関しては面発光レーザが注目されているが, この素子は光ネットワーク伝送や光インターコネクタへの応用も有望である。

また, 発光効率の飛躍的改善や新機能の実現には, 半導体材料以外の有機材料の応用や, 人工的に光に対するバンドギャップや分散あるいは異方性を制御できるフォトリソニック結晶の概念を導入することが今後ますます重要になると思われる。前述の高周波デバイスと光デバイスの状況を表1にまとめ, 今後の方向を示しておく。

■ パワーデバイス

パワーデバイスは, 図1の電圧-電流定格図に示されるように個別パワー素子(光サイリスタ, GTO (Gate Turn Off thyristor), IEGT (Injection Enhanced Gate Transis-

表1. 高周波デバイスと光デバイスの動向
Trends in high-frequency devices and optical devices

	従来からの要求性能	今後重要になる性能	今後の技術動向
高周波デバイス	周波数特性 出力パワー 低消費電力 信頼性	能動素子と受動素子の一体化による高性能・小型・低価格化	MMIC モジュール化
光デバイス	波長領域拡大 出力パワー 信頼性・寿命	大面積/垂直発光領域 発光効率の飛躍的改善 新機能の実現	面発光レーザ 有機材料の開発 フォトリソニック結晶

MMIC : Monolithic Microwave IC

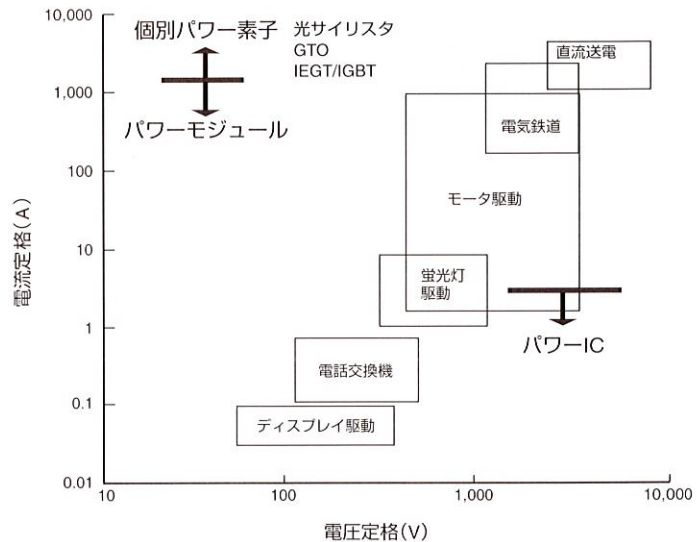


図1. パワー半導体素子とその主な応用分野
Applications of power semiconductor devices

tor), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), パワーモジュールそしてパワーICで各応用分野をカバーしている。

また, 変換損失の改善の観点からは, オン電圧の低減, すなわち素子が導通時に発生する電力損失を最小限にして放熱対策を容易にする努力も行われている。このようなデバイス性能を記述するパラメータの改善は継続して行われるであろうが, 今後はIT分野との融合や応用システムへの対応を考え, システムインテグレーションのコンセプトをパワー素子自体の設計, あるいは周辺回路に取り込むことが重要である。例えば, SOI構造を利用した誘電体分離技術により, 高耐圧回路部分と小信

号を扱う回路部分をチップ上に一体化したパワーICは, インテリジェント化の方向である。このような構造により, パワー素子を制御する信号を効率的に供給できるだけでなく, 保護回路の付加などが容易になる。

このようなチップレベルでのシステム化以外に, 高耐圧系素子の場合, 特殊なパッケージを用いて複数チップを並列駆動し大電流化する傾向, また, 周辺保護回路や放熱部を一体化させるモジュール化が重要な方向になっている。

更に, 最近ではワイドギャップ半導体であるSiCを用いたパワー素子の研究が進み, シリコンパワー素子の性能指数の限界(耐圧, オン電圧)

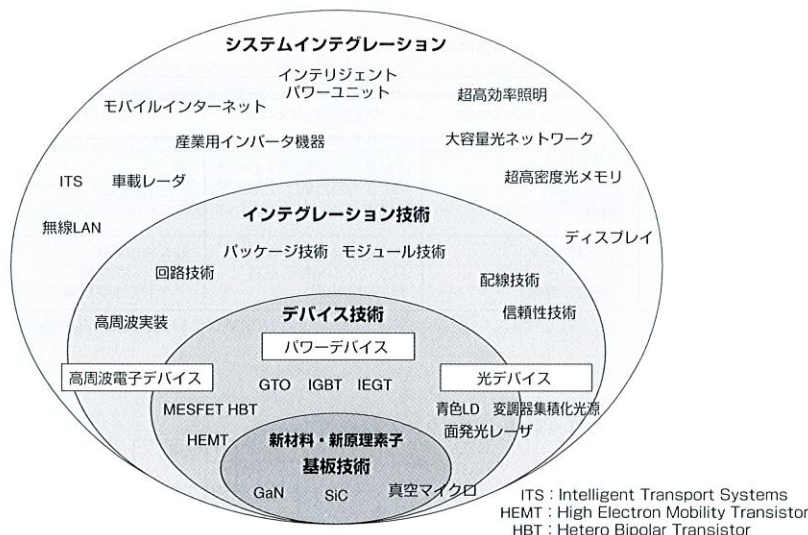


図2. システムの飛躍を支えるディスクリート半導体デバイス ディスクリート半導体デバイスは、新材料・新原理を取り入れながら特性向上を目指し、更にインテグレーション技術を組み合わせてシステムの飛躍を達成している。
Evolution of discrete semiconductor devices toward system integration

を超えるものが試作されている。これは新材料が次世代のディスクリート半導体デバイスを切り開いている好例である。

図2にディスクリート半導体デバイスがシステムの飛躍に向けて成長していくようすを示した。

新しい潮流を目指して

半導体については研究と言えども経済性抜きで議論はできない。もっと広く言えば半導体技術は社会における雇用問題を根本に含んでいるとも言える。

また、先に述べたように、どんな社会を望んでいるかといった個人の価値観に近いものまでも含まれており、極めて社会的な問題である。低消費電力、超微細化、高信頼性といった技術項目は、もちろん現在極めて重要であり手を緩められない。これらが進展していけるように徹底的に基盤技術を深めていかななくてはな

らないことは言うまでもない。ただ、これらによって実現されるであろう世界に対しては、それだけの現状型の研究の追求だけでは解は見えてこない。高度の設計技術をもってしても同様である。この部分をどう突破していくかが、今後の半導体技術の世界を作っていくうえで避けて通れない極めて重要な部分になると思われる。

ディスクリート半導体デバイス分野にとって、これからの重要な流れとしてはシステムインテグレーションであろう。ディスクリート半導体デバイスの場合、いわゆるSoCとはやや概念を異にしている。それは、個別素子の性能を最大限に引き出しながら、最終応用への橋渡しをするパッケージ技術やモジュール技術、そして周辺の駆動回路/保護回路や実装技術を包括したコンセプトであるからである。

更に、今後は半導体が半導体だけで閉じていては真のシステムとは言

えないであろう。そこには、微細化で当然顕在化する、いわゆる量子効果を含めたナノテクノロジーも入るかもしれないし、シリコン技術においても論外であった光技術が出发点において融合されるかもしれない。

また、バイオテクノロジーのような半導体以外との接点を通した単に組み合わせるといふ以上の、原点における要素での融合が必要になってくる可能性もある。ここには、従来の分析的研究、あるいはsomething new 的研究からだけでは出てこない新しいタイプの研究が必要である。

今回の特集では、この部分の題材については含まれていないが、この種をいかに育てていくかが、今後の情報通信技術推進の要素技術からのもう一方のアプローチであろう。また、このことが設計技術についても新しい潮流を築くに違いない。この部分は産官学の区別なく新しい発想で取り組むべき課題である。デバイスメーカー自身も注力すべき大きな付加価値のつく研究領域と考えている。



鳥海 明

TORIUMI Akira, D. Eng.

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー室長、工博。極微細CMOS、絶縁膜技術、量子効果デバイスの研究開発に従事。日本物理学会、応用物理学会、米国物理学会、IEEE会員。
Advanced LSI Technology Lab.



成瀬 雄二郎

NARUSE Yujiro, D. Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー室長、工博。半導体X線センサ、赤外線センサ、量子効果デバイスの研究開発に従事。応用物理学会、IEEE会員。
Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.