

# 半導体デバイス用の材料開発の変容

村上正紀 (工博)

京都大学大学院・工学研究科教授

## Direction of Materials Development for Future Semiconductor Devices

Dr. Masanori Murakami

はじめに = 古代から“材料”をキーワードにして時代が区分されている。このことが材料屋にとっての一つの誇りでもあり励みでもある。「鉄器時代」、「青銅器時代」はとくに過ぎ去ったとしても我々の学生時代には「鉄は国家なり」という言葉に嘘され、国内の製鉄業は天井知らずの拡大の一途を辿り、金属系の学生の就職希望が鉄鋼企業へ殺到した時代が一昔前のように思える。ここ20年来で主役が入れ替わり、現在は「半導体時代」の最盛期である。身の回りの電子デバイスの大半が半導体を持ちいて作られ、「データ・ハイウェイ」、「マルチ・メディア」、「半導体は産業の米」などなどの半導体時代の落とし子ともいえる流行語が嘘されている。過去に全盛期を迎えた鉄鋼企業を初めとする素材製造企業までもがデータ・ハイウェイを走る“半導体電車”に乗り遅れまいと必死に汗水をたらしながら走り続ける姿は今でもチラホラ見受けられる。この現象は日本特有の現象であるが、日本で発生した地震による津波の影響のごとく ASEAN 諸国にまで押し寄せている。このことをもっとも身近に感じたのは1996年10月に北京で開催された半導体関連の国際学会に出席したときである。10年ほど前までは鉄鋼関連の学会および企業誘致に全力を注いでいた中国が、今やすべて半導体に全力投球している様子を目の当たりにすることができた。学会には中国長老組がぞろぞろと参加され、「半導体を知らずして中国人にあらず」といわんばかりの熱弁ぶりである。数年前に二言目にはできていた「鉄鋼」というキーワードはまったく陰を潜めている。半導体材料の研究に十数年間くらいしか関わっていない著者が中国人に初めてもてはやされ、万里の長城に登った気持ちとはこのことか、と一人で悦に入ったのも2年前のことである。

このように書けば半導体産業はバラ色の最先端技術イリュージョンに包まれた響きを持つが、実際に半導体製造・技術に携わる者にとって、それは必ずしもバラ色ではない。研究の最先端を担うべき我々にとってですら、最近の先端技術の進歩はめまぐるしく、専門雑誌から少し目を離すとすぐさま技術のつぼに落ち込み、“先端”という二文字から遠ざかる感じがする。また製造に携わる者にとっては新しい技術が製品に結びつく可能性がでてくるや否や企業にとっての最大の課題である“合理的投資”と“コストダウン”で悩まされる。

今年の初めに編集委員長より「半導体デバイス用の材料研究の最近の動向」について書くように依頼された。しかし、半導体デバイスは非常に領域が広く、それぞれ

のデバイスの技術動向については限られた紙面では書き尽くせないで、これらの詳細については専門誌に委ねることにする。今回は主に、素材産業に携わる材料屋が次世代半導体デバイス用の材料を開発する場合に、つねに念頭に置かねばならない点について、標記のタイトルで思いのままに記述する。本論に入る前に読者の中には半導体デバイスを専門にされておられない方もおられるので、まず半導体デバイスの魅力について述べ、次にこのデバイスの開発の最近の動向について述べる。

### 1. 製造業にとっての半導体デバイスの魅力

この半導体産業が製造業にとってなぜ魅力を感じるのであろうか？ 魅力は数々あるが、主に下記の3点が半導体デバイス特有の魅力と感じる。

第1の魅力は半導体デバイスが我々の日常生活に不可欠な製品であるということである。現在の高度社会は半導体デバイスなしには成り立たない。家の中を見渡しても、また一歩外に出てみても、半導体デバイスが内蔵されているものに目が触れないことはない。1947年に米国のベル研究所でバーディンとブラッデンによりゲルマニウムでトランジスタ効果が発見された当時、わずか50年の歳月で半導体技術がこれほど深く日常生活に浸透するとは誰も予想しなかったと思う。このように半導体技術が我々の日常生活に短期間で浸透したのは半導体デバイスが“人間の低次の欲求”である衣・食・住の充足と安定に大きく貢献したためである。まず、誰もが衣食住の充足を求め、働くことを惜しまない。したがって、衣食住の充足欲を満たすものであればだれでもが買い求め、量的にはこのような商品が“よく売れる商品”であることは言うまでもない。半導体デバイスは主に“住”を充足する製品として、直接、目の当たりにすることが多い。しかし、原料から我々が手にできるまでに加工された“衣・食”になるには半導体デバイスの恩恵を幾度も被っていることを忘れてはならない。もっとも低次の欲求が満足されると、人間は次に生活の向上および安定を求める。この欲求を満足させたい人は先進国では人口の大半を占め、高級志向の商品も量的によく売れる製品になる。自宅での生活の快適度の増加には半導体の貢献するところが大きい。身近なものでは高輝度のテレビ、低温で省電力消費量の冷蔵庫、自動的に温度を調整してくれるエアコン、洗濯から乾燥までしてくれる洗濯機およびスイッチを入れただけで炊きあがる自動炊飯器などが挙げられる。これらの商品が、主婦の生活のゆとりに貢献できたということには異論ないであろう。現在

もなお、半導体デバイスは、生活の快適さのさらなる向上を目指して発展し続けている。また最近の自動車、電車および飛行機の安全性および乗り心地の良いのは、直接目に触れることはないが、半導体で作られたセンサーが多く使われるようになったからである。

第2の魅力は半導体デバイスが日常生活に不可欠な製品であるにもかかわらず、付加価値が高いことである。衣食住の充足欲を満足させる商品は量的には多いが、食料品を初め、全体的に付加価値の低いものが多い。本州と四国を結びつける長大な吊り橋、線路および高層建築物などの構造材料としてもっとも多く使われるのは鉄骨である。この鉄鋼材は日本国内だけでも量的に約1億トンが生産され、その付加価値を1グラム当たりの単価に換算すると、0.05円/グラム位である。我々の主食である米は食料品の中では一番多く生産されているが0.5円/グラムの付加価値しかない。それに比べ、半導体デバイスのもっとも重要な役目を果たす半導体材料は、Siですら500円/グラムの価値があり、化合物半導体の代表例であるGaAsでは付加価値が一桁高くなる。このように日常生活に不可欠な製品で付加価値の高いものはあまり例を見ないのである。しかも、この半導体基板の上にデバイスを形成すれば、付加価値はさらに一桁跳ね上がる。付加価値が高ければ高いほど高利潤の可能性もある。しかも高い利潤の可能性のある商品ほど製造業にとっては魅力ある商品になる。半導体デバイスはこの種の商品に類別されるのではないだろうか。

第3の魅力は半導体技術の応用の拡大が天井知らずだということである。半導体の電気特性は外部からの少しのエネルギーで変化するため、熱、光、電界などなどの変化を敏感に電気に変換する。また、逆に電気を光に変化させることもできる。半導体は他の物体にない固有の特性を有するため種々なデバイスにすでに応用されてきてもいるが、将来も半導体技術は未知のデバイスの開拓の可能性を秘めている。このように神秘的な半導体技術が研究・開発者に生き甲斐を与えるのである。製造業での研究・開発・製造に携わる者にとっては開発する喜びのある製品を商品化し、未知の世界を切り開けることが働く喜びとなり、新しい製品を開拓する原動力となる。

まだまだ半導体産業の魅力は数多くあるが、上記の主な3点により、半導体は天井知らずの需要の増大を示している。全世界の半導体の売り上げはもちろん、世界経済に左右されるが、21世紀に向けて、先進国のみならず、開発途上国でも大きな売り上げの増加が期待できる。このように長期にわたって、需要の増加が期待できる商品はほかに類がないといっても過言ではない。

## 2. 半導体デバイス研究・開発の最近の動向

次世代コンピュータにSi半導体技術が最適であると確信をえてからはあまり長い年月を経していない。25年前にはまだSi半導体、化合物半導体、および超電導体デバイスの演算速度の比較表を壁に掲げ、デバイス専門家の厳しい議論に、デバイス設計については無知な小生が立ち会わされたIBM時代が今でも記憶に残っている。

当時は演算速度算出のための要素技術確立に主力を置き、比較的シーズ(seeds)的な研究志向であったと思う。

20年前にやっとSi半導体が完全にコンピュータ分野を勝ちとったように思える。1980年代からは、国内では主にDRAM(随時書き込み読み出しメモリ)製造に主流がおかれ、研究・開発(R&D)パイロット・ライン量産体制が確立されるようになった。このような時代にはデバイスのR&Dは主に研究所でおこなわれ、ある程度の目処がつけば、事業部に移行され、試作および量産がおこなわれる組織体制が多くとられていた。その頃の開発・量産体制では新デバイスが比較的のんびりした期間(約4年)で市場に出回り、これが一般にいわゆる4年ごとのシリコン・サイクルである。米国の大統領選挙時、またはオリンピックの開催される時期に応じて半導体の景気が良くなったもので、オリンピック・サイクルとも呼ばれていた。

1990年代からは4年のシリコン・サイクルに大きな狂いが生じてきた。パーソナル・コンピュータ(PC)が日常生活に不可欠になったのは半導体メーカーの大きな喜びである。しかし、半導体業界にとってはPCの普及は手放しでは喜べない。というのは、消費者の新製品に対するニーズ(needs)が過熱し、企業側の新商品戦略に拍車をかけ、現に、1年間を待たずしてPCの価格破壊および性能破壊が起こっている。もちろん、DRAM自体もその影響は直接的に被っている。このような状況では次世代製品の開発に時間をかける余裕がない。しかも短期間の投資回収が要求されるため、かつての4年ごとのシリコン・サイクルで新機種を開発していたのではまったく間に合わなく、デバイス世代交代のリード・タイムの短縮化が要求される。今や、シリコン・サイクルは1.5~2年と大幅に短縮された。このような状況ではもはや、R&Dパイロットライン量産体制は成立しなく、オフ・ラインの装置を使ってR&Dをする余裕はまったくない。

化合物半導体でも同様な現象が見られる。化合物半導体のデバイスの応用範囲はSi半導体より桁違いに広いが、化合物半導体デバイスを市場すべて統合してもSi半導体の市場の3%くらいである。売り上げがSi半導体とくらべ、桁違いに少ない化合物半導体デバイスではSi半導体デバイスより熾烈な市場争いが展開され、一日でも早く、次世代のデバイスを市場に出すことが市場独占の大きな鍵を握る。

化合物半導体の代表例として、毎日のようにマスコミを賑わす三原色発光ダイオードを例にとって見る。GaAs系の化合物半導体をもちいて、1カンデラ以上の明るさを有する赤色発光ダイオードの開発には25年以上も要した。しかし、青色および緑色発光ダイオードの開発はInGaN系の化合物半導体がもっとも有望視されるや否や1カンデラ以上の輝度の発光ダイオードが数年で開発された。これは赤色の10倍以上のスピードで開発されていることになる。この迅速な開発スピードの背景は、とりもなおさず、各企業の生死を賭けた市場独占欲がある。

しかし、このInGaN系半導体には赤色発光のGaAs

系および GaP 系半導体に比べ 2~3 桁高い密度の格子欠陥が含まれ、従来の常識では発光は絶対に不可能であると考えられる。本来ならば、このような高密度の欠陥が存在するにもかかわらず、InGaN 系では何故これらの欠陥が発光消滅源とならないか、を理解しなければ発光ダイオードを市場に送り出せなかった。しかし、現在ではこのような従来の開発体制で InGaN 系発光ダイオードを開発していたのでは、世界の競争力にはまったく歯が立たない。R&D と量産は直結で製品を市場に出しているのが現状であり、シリコン半導体の体制とまったく同じである。

### 3. 次世代デバイス開発での材料屋の姿勢

前節で強調したいことは半導体デバイスを初めとするエレクトロニクス企業は鉄鋼、造船、建築などの重工業以上に、消費者の過熱気味のニーズを満たすため、非常に目まぐるしく技術革新が強いられ、各企業間の競争は熾烈である。今日、主力であった製品が数カ月後（極端な場合には明日）には消費者はまったく見向きもしなくなるのは日常茶飯事で、この分野の技術開発に携わっているものは毎朝、新聞で“新製品”の欄を見るのが恐ろしい位である。材料の特殊な物性の発見をもとに、新デバイスを開発し、新たな市場を開拓するシーズ志向の R&D は最近はまったく陰を潜めている。

もちろん、半導体デバイス開発に携わる材料屋の姿勢にも大きな変革が求められる。20 年前には新しい半導体デバイス開発において材料屋は歌舞伎の黒子の役割でしかなかった。デバイス設計屋がすでに現存する材料の物性値を組み合わせ、演算遅延速度や発光強度を計算し、材料に携わる研究者、および技術者は設計図を片手に積み木のごとく各種の材料を組立てるだけの役目が主流であった。現に、我々の学生の頃、電気産業に就職した者は数年に一人くらいしかいなかったことを記憶している。企業も材料屋を求めなかったし、学生も当初より喜んで黒子役をするものがいなかったせいだと思う。しかし、当時の特典は、企業側の材料屋に対する期待が小さかったゆえに、4 年間のシリコン・サイクルに合わせ、ゆっくりと材料の本質を見つめる時間が、材料屋には大いにあったことである。

現在では電気産業での材料屋への要求度合いはまったく異なる。前述したように、新デバイスの開発期間が大幅に短縮されたため、デバイス開発当初より、性能のみならず、歩留まり、コストを念頭において開発を始めなければならなくなった。一夜にして、次世代デバイスの高性能化、高信頼化および低コスト化が一度に材料屋の両肩にのしかかってきたようなものである。電気メーカーおよび装置製造メーカーでも材料屋は檜舞台に立ってスポット・ライトを浴び、学生にも材料屋はもはや黒子役だけではない、という認識が浸透し、電気産業に就職を希望する材料系の学生が格段に増えた。

しかし、このように材料屋がもてはやされる時代でも材料屋にとっては喜ばしいことばかりではない。現状では材料屋はめまぐるしく移り変わるデバイスの渦中に巻

き込まれ、材料の本質を考える余裕もなく、デバイス製造プロセスから生じる問題の火消し役にまわっている場合が多い。この状況は消費者のニーズに応えるためには将来も続くと考えられるが、材料屋が火消し役ばかりを演じていたのでは材料の新しい学問体制は構築されず、現在もっとも求められている普遍的な電子デバイス材料学の進展は望めない。これでは折角檜舞台に立てたと思っている材料屋がまた黒子役に転落する可能性がでてくる。材料屋が大幅に短縮されたリード・タイム環境でいかに主役を長く演じるか、を考える時期である。下記に半導体デバイス開発に従事する材料屋の本領を発揮するため、材料屋の望まれる取組み姿勢について述べる。

まず、第一に材料屋に望まれることは、電子デバイス材料の長期的な展望を予測する実力を養うことである。現在ほど、次世代半導体デバイスの高性能化、高信頼化、低コスト化に材料屋が“直接”貢献できる時代は今までになかったことを前述した。材料屋が従来のようにすでに設計されたデバイスを製造するだけでなく、新デバイスを材料屋自身が開発できる時期である。現に次世代 Si 半導体デバイスに不可欠な銅配線、ダマシン構造、CMP などは材料屋が主体となり開発した画期的なデバイス・プロセスであり、高性能化、高信頼化、低コスト化に寄与しつつある。このように次世代デバイス創製に画期的なインパクトを材料屋が与えるには、材料の基礎学問だけでなく、総合的な知識が必要なことはいまでもないが、もっとも重要なことは 10 年、20 年先を考えた長期的なプロセッシング・サイエンスを構築する気構えを持つことである。上記の Cu 配線を実用デバイスに適用させる基礎研究は、まだアルミ配線が主流である 30 年前に米国の IMB ですでに始められ、長い歳月を経て、今日実用に至った。このような長期的な材料展望が半導体デバイスの大革命をもたらすことを念頭に置いて欲しい。

第二に材料屋に望まれることは製造プロセスに対する能動的な取組み姿勢である。次世代デバイス開発には、R&D と量産段階のすみ分けはまったくなくなり、開発と量産に共通した製造プロセス（一般にフィールドと呼ばれる）で材料屋が多く求められる確率が高くなる。しかし、ほとんどの材料屋はフィールドでは新発見はないと考えているが、材料分野では発見および発明を目的とした基礎研究よりも製造プロセスから新現象を見出す確率が非常に高い。フィールドはまさに新現象発見の宝庫であることを認識し、プロセス業に積極的に従事する姿勢が求められる。受動的な姿勢でプロセス業に従事していたのでは、箸を出す前に流し素麺が流れ去ってしまうがごとく、新現象発見が見逃されがちである。プロセスから発見される機能材料の新現象を構造材料で構築された基礎学問と結びつけ、新しい材料学を展開するプロセッシング・サイエンスを自分で確立する能動的な姿勢が電子デバイス材料学発展に望まれている。

まだ日も浅く未熟な電子デバイス材料学の確立のために、長期的な視野で材料の本質をつねに考えながら、フィールドを見つめ、次世代デバイスの開発に励んで頂くことを期待しながら、この書を終える。