真の LSI 材料革命とは

角南英夫

どんな材料もその物理的・化学的性質の限界から逃れることはできない。1970 年には素子寸法が $10\mu\text{m}$, 2000 年にはその $1/100$ の 100 nm と不断の微細化が達成されてきた Si 大規模集積回路 (LSI) は、まず絶縁膜から物理限界に直面した。SiO₂ 膜に換算して 1 nm ($10\text{ \AA}$) の厚さの絶縁膜に 1 V を印加する耐圧が切望されているが、膜中の電界は $1,000\text{ 万 V/cm}$ に達し、制御が困難なトンネル電流が流れてもはや絶縁膜とは呼べない。この障害に直面してなお素子性能を上げるために高い誘電率の絶縁膜が望まれ、Hf, Zr や Ir, Ru などの酸化・窒化膜が使われ始めた。一昔前には考えもしなかった希少な元素である。

一方、LSI の高速動作のため層間絶縁膜は低誘電率が望ましく、有機・無機絶縁膜の開発がたけなわである。SiO₂ の約半分の比誘電率: 2 以下が目標である。原理的にはほぼ 2 倍の高速化が期待できるが、他の構造材の制約によりたかだか 20~30% の改善にとどまる。ここに単体材料改良の限界があり、LSI 構造全体の材料設計が不可欠である。この限界とあながち無関係といえない例として、一昨年マイクロプロセッサの先導企業が「動作速度は 4 GHz を上限とする」という事実上の高速化終息宣言を行った。主因は動作速度に比例する消費電力の増大であり、たかだか 1 cm^2 程度の Si チップで 100 W を消費するまでになっては納得せざるをえない。Si トランジスターは百数十℃以上では所望の動作をしない。SiC にすれば数百℃まで動作するが、LSI 化には数え切れない課題があり解決できる目処は立っていない。だが、材料開発が難しくなるほど初期寡占化傾向が顕著になり、成功すれば巨大な市場が開ける。技術開発マネジメントの機微を感じる。

そして、究極の限界はトランジスター動作そのものに存在する。現在の微細化速度が続くとすれば 2030 年には 1 nm の素子が期待される。これは Si 原子が数個並んだ寸法であり所望のスイッチング動作は得られない。微細化の実質限界は $5\sim 10\text{ nm}$ とされ、現在の開発速度でいけば 2015 年に到達する。「あと 10 年で LSI は終わりだ」という短絡的悲観論がときに頭をもたげる素地はここにある。しかし現実には、ダイナミック RAM は開発速度が半減して息をながらえ、プロセッサではマルチコアなど新たな工夫によって機能向上を果たしており、「あらゆる機器がより高度にエレクトロニクス化される」という動向は、少なくとも今後数十年は保たれると想像している。

このように Si-LSI には越えられない物理限界がある。現在はこの限界を克服すべく、さまざまな材料を開発している時代であり、「材料革命」が始まっている。しかし筆者の考える真の「材料革命」はここにはない。現在のノイマン型コンピューター*にとって、さらなる素子の高速動作と大規模化が不可欠である。この概念とまったく異なる領域、すなわちアナログ的並列動作、多数決論理、画像を一体化して認識するなどの、いわば「人間の脳」を模した素子がノイマン型の生まれながらの欠点を補完できる。この素子材料こそ 20 世紀半ばのトランジスターの発明を超え、かつ補完できる真の「材料革命」だといえる。「個々の動作は遅くとも放射線障害に強い、曲げられれば実装も容易、多数決論理だから欠陥にも強い」：このような材料がバイオと高分子材料の融合で考えられないだろうか。まもなく一線を退く筆者の後世に期待する究極の材料革命である。

*フォン・ノイマンが提唱したコンピューター形式。プロセッサとメモリーで機能分担し、格納されたプログラムで逐次処理する。パソコンを含む現在のほとんどのデジタルコンピューターの形式。

SUNAMI, Hideo 広島大学ナノデバイス・システム研究センター (739-8527 東広島市鏡山 1-4-2)・教授、工学博士。1969年 東北大学大学院工学研究科電子工学課程修了 専門はシリコン集積回路におけるデバイス・プロセス研究開発。
What Is True Material Revolution in LSI?