

いずみ かつとし

## 泉 勝俊

(大阪府立大学 産学官連携機構 教授)

「Anything new?」という問いかけに応えて、夢を実現した SIMOX 基板の開発



いまや生活のあらゆる場面で活躍しているシリコン LSI。その高性能化、低コスト化は止まることなく進展している。泉はシリコン基板表面から酸素イオンを打ち込んで基板内に酸化膜を形成するという奇想天外なアイデアを育て、シリコン半導体の高性能化にとって理想的な SOI 基板構造を実現し、実用化レベル SOI 基板の先駆となった。ハイエンドマイクロプロセッサ、低消費電力デバイス、宇宙環境用デバイスなどへの実用化が進展している。

### 「Anything new?」という研究室長の問いかけ

1976年、電電公社(現在のNTT)武蔵野電気通信研究所電子装置研究部電子回路研究室の泉勝俊は、イオン注入装置の調整を終えて、廊下を歩いていると、向こうから研究室長の有吉昶がやってくるのが見えた。泉は、「またいつもの問いかけがあるな」と身構えた。有吉が声をかけてきた。「Anything new?」。やはり思った通りだった。顔を合わせるたびに「何か新しい話はないか?面白い結果が出てないか?」と聞いてくる。

1年前に有吉研究室長自身が決断して研究室全体としてまったく新しい目標である「CMOSによるLSI」に取り組み始めたところであったから、室長としては何か新しい研究の種類はないかと絶えず思案していたのである。

泉は名古屋工業大学の電気工学科修士課程を終えて4年前に研究室に配属された。3年ほどの間高抵抗薄膜素子の研究開発を行っていたが、研究室の方針変更に伴って当時開発されたばかりのイオン注入技術の確立に取り組み、ようやく目処がついてきたところだった。「何か新しいこと」をやりたいという気持ちはあっても簡単には見つからない。有吉室長と

顔を合わせるたびに「Anything new?」と聞かれ、「Nothing」と答えるしかなかった。

あるとき、半導体関連の研究論文誌や雑誌記事を読んでいると、サファイア結晶の表面にシリコン結晶を成長させるという話に出会った。シリコン素子の高性能化が実現できるという。ただし、サファイア結晶の原子の並び具合とシリコン結晶の原子の並び具合が少し違うため良質の結晶ができないのが問題だった。

これは面白そうだ。良質の結晶を作るにはどうしたらよいか？ 泉の頭の中に様々なアイデアが浮かんできた。今使っているイオン注入技術が使えないか？ サファイアでなくてシリコンそのものを出発材料として使えないか？ などのアイデアが泉の頭を駆けめぐった。このテーマが結局、その後の 30 年間のテーマになるのだが、そのときの泉には予測もできなかったことである。

このようなテーマがシリコン素子の高性能化にとってなぜ重要なのか、どのような効果が期待できるのかについてまず解説して、その後で、泉の研究開発の足跡をたどってみることにしよう。

## 生活のあらゆる場面で活躍するシリコン LSI

半導体素子が組み込まれた機器は、コンピュータ、テレビ、インターネット、携帯電話、オーディオ機器、自動車、冷蔵庫、洗濯機、ゲーム、おもちゃなど、社会のあらゆる場面において使用されている。半導体素子の中でも、シリコン LSI は、数量の点でも、重要な制御機能の役割という点でも、半導体素子の中心的役割を果たしており、現代社会の基盤を支えるものとなっている。これは、シリコン LSI の優れた機能性、電力消費量の低さ、低コストという特徴によるものである。

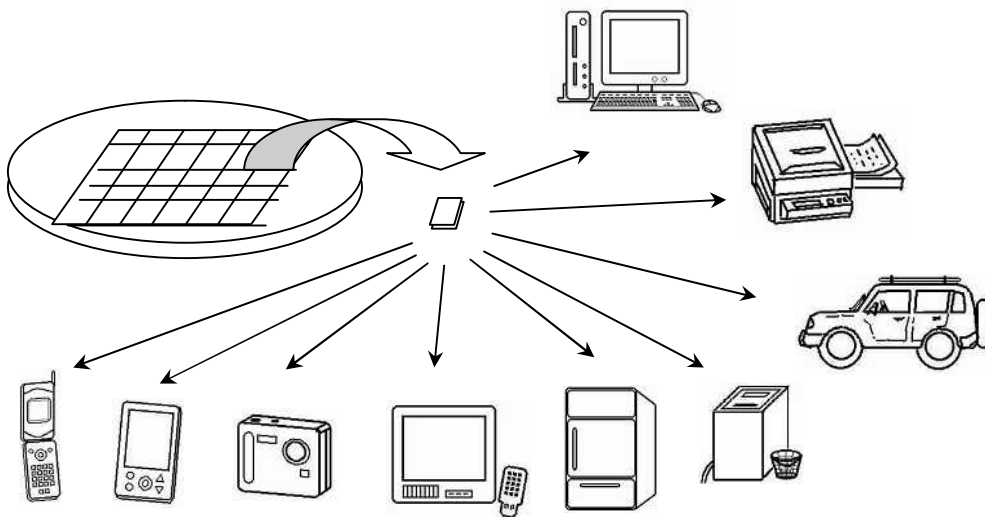


図1 シリコン基板上に形成された LSI とその応用の広がり

シリコン LSI は、薄いシリコン結晶の表面にトランジスタ、抵抗素子、容量素子、それらをつなぐ配線などを作り込んだものである。シリコン素子の高性能化は、主に、作り込むそれぞれの素子の寸法を微細化して実現されてきた。その結果、作り込まれた素子の総数も飛躍的に増加し、1 センチ角のシリコン LSI に作り込まれるトランジスタの数は、10 億以上になっている。

シリコン LSI の製造に用いるシリコン基板は、厚さ 1 ミリメートル弱であるが、トランジスタ等が作り込まれているのは表面の数ミクロンの層にすぎない。その下の領域は、土台としての役目を果たしているだけである。この支持基板部分を絶縁材料で置き換えたものが、SOI(Silicon On Insulator)基板である。

### シリコン LSI の高性能化にとって理想的な基板構造

SOI 基板構造は、シリコン半導体素子の高性能化にとって理想的な基板構造であり、これを使えば、絶縁分離による高耐圧化や余分な容量成分を減らしたことによる高速化や低消費電力化などが実現できる。このことは、早くから知られており、1960 年代から SOI 基板構造実現の試みが検討されてきた。

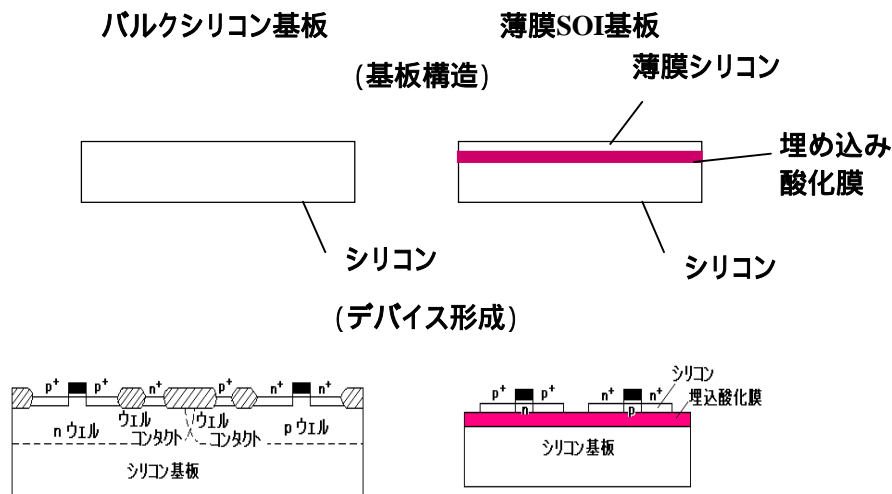


図2 通常シリコン基板と SOI 基板の比較

絶縁体結晶であるサファイア基板上に単結晶シリコン層を成長させた SOS (Silicon On Sapphire) 基板や、2 枚のシリコン基板の表面に酸化膜を形成した後に両者を貼り合わせて一方のシリコン基板を所定の厚さだけ除去して表面シリコン層を薄くした貼り合わせ SOI 基板などがその代表例である。泉の目にとまったのはこの SOS 基板であった。

しかし、いずれも、コスト、表面シリコン層の結晶性、表面シリコン層の膜厚制御などの点で十分ではなく、宇宙用など特殊な用途で実用化されているにすぎない。

そこで、これらの従来構造の SOI 基板に比べて、コスト、結晶性および膜厚制御のいずれの面でも優れている SOI 基板が求められていた。特に、近年、微細化によって進められてきたシリコン LSI の高性能化が頭打ちになるという予測が共通の認識になってきて SOI 基板へ

の期待が大きくなってきた。

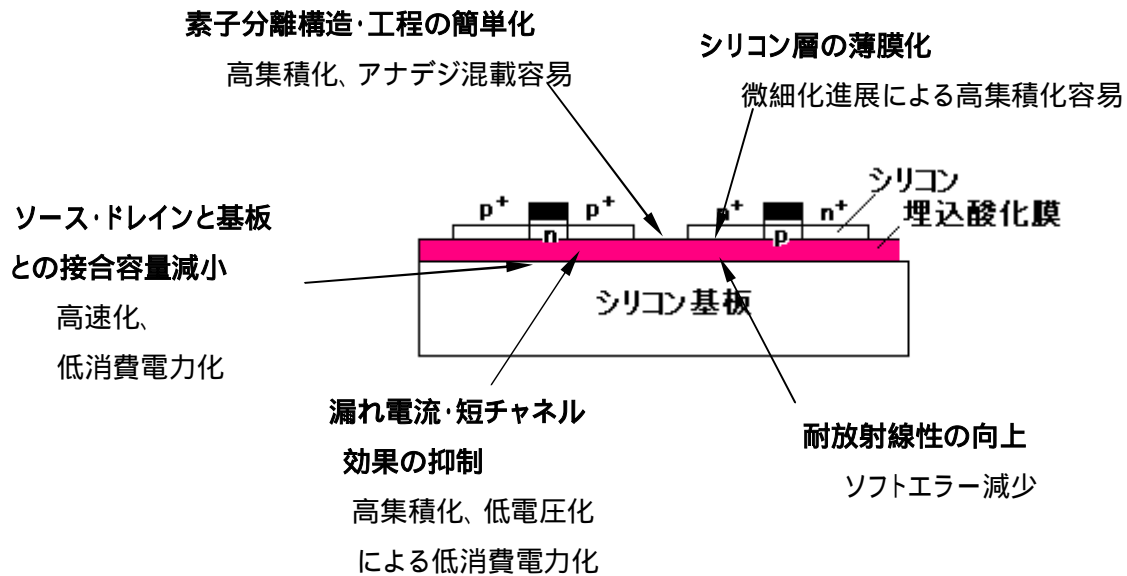


図3 SOI 基板のメリット

1978年にSIMOX基板が泉によって発明され、これを契機として1980年代にはSOI基板上に形成したトランジスタ特性の研究が進展し、SOI基板の特徴を生かした様々なデバイス構造が提案された。そして、1990年代には、SIMOX基板を用いて、高性能LSIの開発が重点的に行われ、特に、1998年にIBMがハイエンドマイクロプロセッサに採用したことは大きな影響を与え、SOI基板採用への流れを決定的なものにした。

SIMOX技術が無ければ、SOI基板がシリコンLSIにとって理想的な基板構造であると言っても、それは絵に描いた餅に過ぎなかったのである。SOI基板が実用的な技術であることを示したことはSIMOX基板技術の大きな功績である。

また、SIMOX技術に触発されて、SmartCut法やELTRAN法といったSOI基板技術が開発され、高品質化と低コスト化を目指した競争が進んでいる<sup>1</sup>。

SmartCut法を開発したフランスの国立研究所LETIのM. Bruelは当初SIMOX法の追試と改良に取り組んでいたが、その途上で、酸素イオン注入ではなく、水素イオン注入を利用することを思いついて新たな手法を生み出したものである。

また、ELTRAN法を開発したキヤノンの米原隆夫は、当初絶縁膜上の多結晶シリコン膜あるいはアモルファスシリコン膜を改質して単結晶シリコン膜にすることを目標にしていたが、SIMOX基板の結晶性には及ばないことを悟り、新たなアイデアを得て、独自の手法を開発し

<sup>1</sup> (財) 武田計測先端知財団編、「<MOT事例研究> 注目先端技術 成功の理由」第2

たものである。

このように、SIMOX 技術は、他の実用的レベルの SOI 技術開発の先駆としても大きな実績がある。その背景には、20 数年にわたる表面シリコン層の結晶性改善や埋込酸化膜領域の膜質改善をはじめ、独自の酸素イオン注入専用装置の開発など多くの困難を克服するための苦労があった。

その後、SOI 基板を採用した時計用 LSI (2001 年) などの低消費電力用 LSI も商品化された。また、高周波特性向上や低消費電力特性を生かした様々なデバイスへの応用が検討されている。

今後は、高速化、低消費電力化が特に重要視される分野から順次採用が進み、広範な応用分野において SOI 基板の採用が広がっていくものと考えられる。

実用化レベルの SOI 基板技術の先駆となった SIMOX 技術を実現した泉勝俊の研究経過を辿り、どのような困難を乗り越えて実用化に至ったのかを振り返ってみよう。

## モールス通信の限界を感じて下船

泉は、高校卒業後名古屋高等無線電信学校第二部に入って無線通信士の資格を取り、しばらくは三重県尾鷲港を基地としたカツオ船に乗り組んで通信士として働いた。

2004 年 10 月に発生した「新潟県中越地震」はまだ記憶に生々しいが、実は 1964 年 6 月には後に「新潟地震」と命名された大きな地震が発生したことを知る人は少ないであろう。実は、泉はこの時、まさに通信士として漁船に乗り組み、三重県志摩半島のはるか沖合いを航行中であり、この地震の第一報をモールスで受信した。それによると、新潟市内を流れる信濃川に架かる昭和大橋が崩壊し、新潟港のオイル・タンクが多数炎上中とのことであった。詳細は不明ながら、大地震と直感し、直ちに漁労長に報告するとともに乗組員の親戚・知人筋に関係者はいないか周知したことを泉は今でも鮮明に記憶している。無線通信という素晴らしい技術の恩恵を感じると同時に、モールス信号を聞き取って解読し、一字ずつ原稿用紙の升目を埋めていくもどかしさも感じたという。

そのうち、手動のモールス通信による限界を感じ始め、次第に電気の真髓を学びたいという気持ちが強くなって、船を下りることにした。

大学では、電気の真髓を極めるには強電に限ると考え、電力を専攻した。これが後にイオン注入技術を担当することにつながるとは思ってもいなかったことである。

名古屋工業大学 第二部電気工学科を卒業し、その後修士課程に進んだ。

## 電電公社に入り、研究テーマの大転換

1972 年に修士課程を修了して電電公社に入社し、武蔵野電気通信研究所/電子装置研究

部/電子回路研究室に配属された。この研究室は、海底中継器用に高精度・高信頼性が要求される電子回路をハイブリッド IC で構成する研究が主要な仕事の1つだった。その回路で用いられる高抵抗薄膜素子の研究開発が最初の仕事だった。

1975 年、有吉室長の英断で、電子装置研究部から研究室ごと集積回路研究部へ異動した。移籍の理由は、それまでのバイポーラ・デバイスと薄膜 RC によるハイブリッド IC の時代の次は CMOS による LSI の時代が到来するとの読みによるものであった。同年から、電子回路研究室は LSI/CMOS への取り組みを本格化させ、試作ラインを立ち上げていた。

研究室員は全員が半導体デバイスの試作には素人であり、いわんや CMOS は未知のデバイスに等しかった。当時は、バイポーラの天下の時代であり、民間企業でも CMOS デバイスの研究が始まって間もない頃で、高い信頼性を必要とする通信用回路には CMOS はまだ使えないという意見も強く、電電会社の中で CMOS の研究をしているのは電子回路研究室だけであった。

泉は、電子回路研究室の「製作グループ」(実際にデバイス試作を担当した 10 人ほどのグループ、責任者は道券正延)に所属した。CMOS 試作用プロセスを各研究員で分担し、泉はイオン注入技術関係を担当した。大学で電力を専攻したことが、イオン注入装置を導入する際の担当者決定において考慮されたようだ。

## イオン注入技術に精通

1976 年には担当したイオン注入装置の立ち上げを完了し、CMOS 用 P 型/N 型領域形成のためのイオン注入技術をほぼ確立していた。武蔵野通研で S/D 形成用にイオン注入を初めて使った。当時、電電会社にはイオン注入装置は 3 台あったが、そのうちの 1 台を持っていたわけである。

イオン注入装置に関しては、あらゆる部分に精通するようになって、朝の装置の音で調子が分かるようになっていた。高圧に感電しないように、オートロックがいくつもあったが、調整などの仕事がやり易いように、それをすべて解除して使っていた。

イオン注入装置に精通して、その当時、他の研究室では稼働率が 20%と言われていたが、泉が管理する装置は稼働率 80%だった。メンテナンスも毎月定期的に来てもらうようにしたのだが、電電会社のメンテナンス単価が一般の水道管メンテナンスと同水準に一律に決められており、精密な半導体研究用装置のメンテナンスとしては低過ぎて装置ベンダーとの折り合いが付かなかった。そこで、泉は交換部品等を工夫して、実質的には大型電子計算機のメンテナンスと同レベルにするなどの苦勞をしたという。

## 室長がオリジナリティのある研究を要求

思い切って研究テーマを変更した有吉研究室長は、具体的な成果により研究室の存在意義を早く示したかった。有吉室長は泉と顔を合わせるたびに”Anything new?”と問いかけてき

た。泉は言われるまでもなく、担当していたイオン注入技術関係で何かオリジナリティのある研究はできないかと思案していた。

しかし、CMOS デバイスにおけるイオン注入技術については、それ以前の電気炉を用いた不純物導入によるN型あるいはP型領域形成を置き換えるだけであって、特別新しいアイデアは出てこなかった。

ある日、米国で技術開発が進んでいるというトランジスタ高性能化のためのSOS技術が泉の目にとまった。その技術上の問題は何かと調べていくうちに、表面単結晶シリコンとサファイア基板との界面がポイントであると判明し、この問題解決にイオン注入技術が活用できないかと考えた。

## イオン注入技術を使った非公式テーマ「SOI基板」

「シリコン」、「絶縁物」、「イオン注入技術」という3つのキーワードから出てくるアイデアは「埋め込み酸化膜の形成」だった。これが頭の中に浮かんだ。しかし、常識からすれば、イオン注入技術は、シリコン基板の表面層にイオンを打ち込んでN型あるいはP型領域を形成するのに使うものであり、N型にもP型にもならず、むしろ結晶欠陥の原因になる酸素イオンを注入することは奇想天外なアイデアであった。しかも、通常の注入イオン量に比べて1000倍くらい多くなければならないことは容易に計算できるから、シリコン層の損傷もひどくて回路を作っても機能しないかもしれない。よほどのことでもなければ試してみようという気にもならない。

だが、室長の「Anything new?」との問いに応えるにはこのくらいの奇想天外さが必要だった。まず最初は、単結晶シリコンの中間に酸化膜を差し込むにはどうしたらよいか、などと考えをめぐらせた。酸素イオンの注入量は通常の半導体プロセスの1000倍だから、時間もかかるし、基板の損傷も相当なものになる。そこで、損傷を回復させるための熱処理を行いながら、イオン注入を行えばよいだろうと考えて、高温にした状態でイオン注入を行った。

一般のイオン注入においては、注入時には、基板温度をむしろ低温にするのが普通で、その逆を行くわけであり、装置を自由にいじれることは重要なポイントだった。現在の一般的なイオン注入装置にも基板冷却機能は標準で付いているが、基板加熱機能を付けるのは大変な変更になる。

この埋め込み酸化膜形成の可能性を確かめる予備実験から着手したが、あくまでも非公式で、趣味の範疇にあった。当初からテーマに選んだ訳ではなかったし、テーマに選ぶ権限もなかった。だから、通常の勤務時間の他、すなわち「アフター5」でやった。

当時は、土曜日が半日勤務だったから、土曜の午後と日曜日が稼ぎ時だった。イオン注入装置はよく故障したし、故障は電源の入切で起こることが多いので、安定な状態に保つには通電し続けるのがよいということから週末も通電していた。これを利用した訳である。もっとも、通電し続けることを認めてもらうためには、警備保安担当者を納得させなければならず、大変であった。

酸素のイオン注入で埋め込み酸化膜を作るというアイデアを思いついてからは比較的順調に進み、イオン源としてCO<sub>2</sub>ガスを選定してポンペを発注するまでに3ヶ月、2週間してポンペが届き、その後3ヶ月の実験で、断面構造の確認や酸化膜の物性評価まで進んだ。

実験での最初の大きな問題はイオン源からイオンを引き出すための引出電極材料だった。炭素を主成分とする材料からできており、2~3cm径の薄板の中央に2~3mmの開口部が設けてある。電界の最適化のためか、テーパが付いている。ポロンやリンに対しては50~60時間の耐久性が保証済みだったが、酸素イオンに対しては、5時間と持たなかった。酸素と炭素が反応して短時間で消耗する。本番の実験どころか、予備実験の時間にも十分ではなかった。開口が大きくなってイオンを絞りきれなくなるのである。通常なら数分でイオン注入が終了するのに、酸化膜を作るためには、1昼夜あるいは2日もかかる計算だったから、数時間の寿命ではまったく不十分だった。

いろいろな材料を検討し、Tiが良いだろうと考えた。しかし、Tiの加工はなかなか大変であった。硬い材料なのに、加工すると粘りが出て、特殊な切削刃先(バイト)がないと加工できない。当時、研究所の近所の町工場の親父さんが部品をいろいろ作ってくれていた。そこに特殊な刃先を提供する形にして作ってもらった。

Tiを加工した開口部を使って、ようやく1昼夜にわたる酸素のイオン注入を行い、シリコン基板を斜め研磨し、その断面を光学顕微鏡で観察したところ、表面にはシリコン層が残っており、その下に埋め込み酸化膜らしきものができていた。

さっそく室長に報告したところ、大いに興味を持ってもらえた。矢継ぎ早に検証のための測定実験を指示され、赤外吸収スペクトルによるSiO<sub>2</sub>の検出や電子線回折による表面シリコン層の単結晶性の確認などを行った。そのために、通常なら簡単には貸してもらえない他の研究室の測定装置も室長の紹介で、あちこち使わせてもらった。人のネットワークの重要性を感じたものである。

結局、正式のテーマになるまでには、実験に取りかかってから1年以上かかった。その後、山本栄一の力量によるところ大であるが、表面のシリコン層にCMOS回路を作って通常のシ

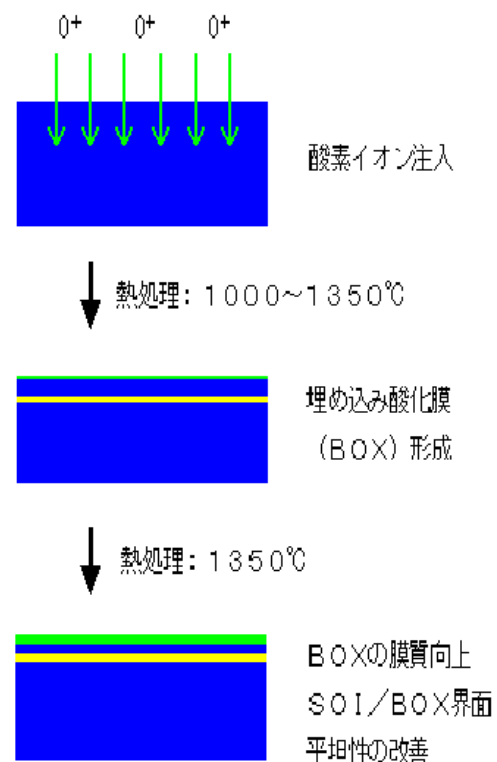


図4 SIMOX 基板作製手順



リコン基板に作ったのと同じように動作することも確認した<sup>2</sup>。ただし、表面のシリコン層には通常のシリコン基板に比べると桁違いの結晶欠陥が存在していた。それでも電気特性としてはまずまずの回路ができた。

## 低イオン注入量でも良質の SOI 埋込酸化膜を実現

特性の良好な CMOS/SIMOX IC が試作できるようになっても、表面 Si 層中に  $10^8 \sim 10^9/\text{cm}^2$  オーダーの転位があるというだけで、通常のシリコン基板(バルク基板)に慣れているデバイス、回路関係の技術者はまともな技術とは見なしてくれなかった。その当時、通常のバルク基板の転位密度は  $10^3/\text{cm}^2$  程度であったからである。

そこで、次の研究ターゲットは、この転位密度を下げることにし、酸素注入量を下げると基板中で何が起きるのかを透過電子顕微鏡(TEM)による断面構造観察技術を駆使して調べ上げた。断面 TEM 技術を使いこなしたことは大きなポイントだった。その当時電電公社通研の TEM 担当者には、「SOI 基板の断面を見るには薄膜試料を作って、それを支えることが必要であり、そんなことはできない」と言われていた。ちょうどその頃(1983 年)、米国の圧力(資材調達、市場開放)が原因で、電電公社が米国企業と共同研究をしなければならないということになって、米国からモトローラと TI、日本から日本電気と三菱電機が参加した SIMOX をテーマにした共同研究が始まった。その中で、TI の評価技術担当者であった R.F.ピニゾットが世界で初めて SIMOX 基板の断面 TEM を見えるようにした。

彼の方法は極めて単純で、少し厚めの断面試料を切り出し、その表面(SOI 基板断面に相当)に研磨剤をたらして、パチンコ玉を押しつけながら回転させる。中央部から薄くなっていき、穴があくくらいに

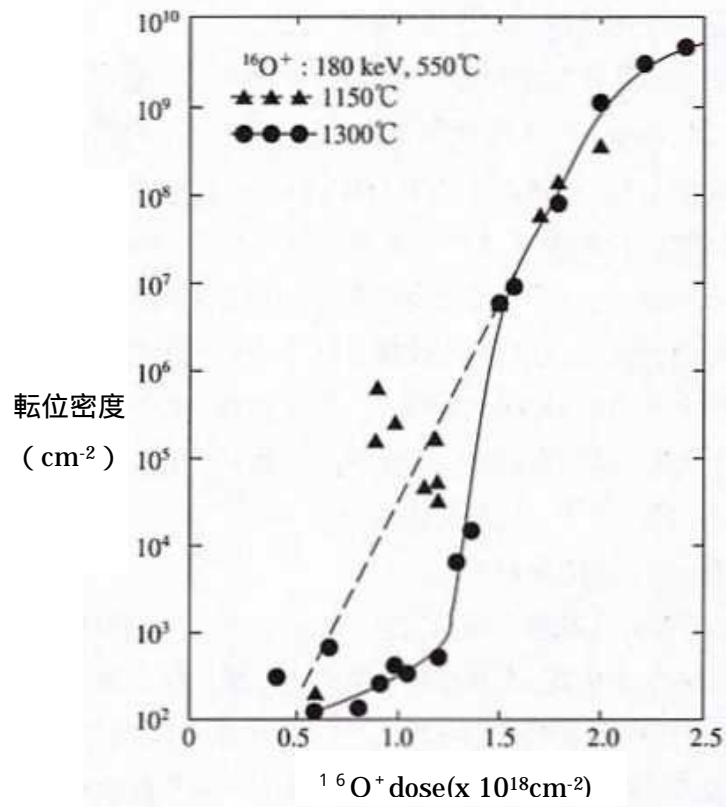


図5 酸素イオン注入量による転位密度の変化

<sup>2</sup> K. Izumi, M. Doken, and H. Ariyoshi, Electron. Lett. 14(1978)593-594.

なれば、その周囲には TEM 観察に適した薄さの領域が必ず存在する、というわけである。表面処理として、その後軽くウェットエッチする。

その後、沖エンジニアリングでも、また、NTT 社内でも断面 TEM 評価を引き受けてくれるようになった。もっとも、こういう観察方法が SIMOX 技術開発のごく初期から使えていれば、逆に、あまりの結晶欠陥の多さに、SIMOX 開発を諦めていただろうと泉は述懐する。

イオン注入量を下げれば転位も減るという予測は誰でもできるが、それでは酸素の量が足りず、良好な埋込酸化膜が形成できないということが大きな問題であった。しかし、それでも、どのような物理現象が起きているのかを知りたいとの興味から実験してみた。その過程で、たまたま特定の低注入量領域で、良質の酸化膜が形成されることを発見した。泉はこの領域を「ドーズ・ウィンドウ」と命名した<sup>3,4</sup>。図5に示すように、酸素イオンの注入量を  $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  程度以下にすると主要な格子欠陥である転位の密度は通常のシリコン基板と同等レベルにまで減少する<sup>4</sup>。ただし、 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  程度にまで少なくすると、図6に示すように、埋込酸化膜は不連続となり、逆に  $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  より多くすると埋込酸化膜の中にシリコンの含有物(Si 島)が発生する<sup>4</sup>。従って、 $3 \sim 4 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$  の範囲においてのみ Si 島のない良好な埋込酸化膜が得られることが分かった。これが「ドーズ・ウィンドウ」である。

その結果、注入時間を 1/5 に削減することができてコスト低減が実現し、あわせて、注入後の熱処理温度を検討して、シリコン層の結晶欠陥の低減や界面の急峻性・平坦性の改善も実現した。

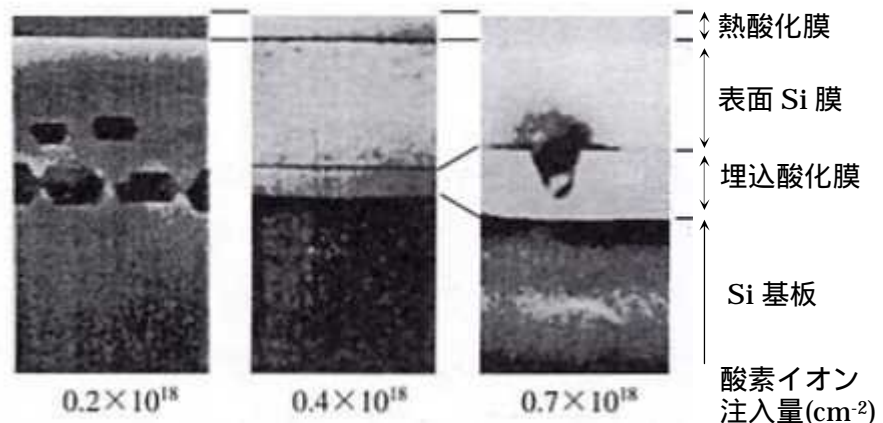


図6 酸素イオン注入量による埋込酸化膜の違い(熱処理後)

物理現象としては、結晶欠陥に注入した酸素が集まって凝集体を作ることが分かった。酸素があまりに多いと Si 原子の周りに集まってその後の熱処理でもばらばらにならず、結晶欠陥の原因になる。また、注入イオンのエネルギーが変わると「ドーズ・ウィンドウ」の領域範囲も変わる。

## ITOX 技術による埋込酸化膜のさらなる改良

低ドーズ SIMOX 基板では、埋込酸化膜が 100nm 程度と薄く、膜質も十分ではなく、かつピ

<sup>3</sup> S. Nakashima and K. Izumi, Electron. Lett. 26(1990)1647-1649.

ンホール(ゴミによる影が原因)も発生していて、その品質向上が大きな課題だった。酸化膜の品質向上については、何とかして熱酸化膜と同等程度に引き上げる策はないかと2年ほどの長い間思案していた。特に、表面のSiを残したまま埋込酸化膜の厚さを増加する方法はないかと夢想していた。

他人には真似のできない技術であるという自負は大いにあったが、SIMOX 基板を使って本格的な回路を試作してみようと言う研究者がデバイス・回路部門にはいなかった。本当に使いたいと思ってくれないと、逆に、使えない理由を探す傾向があると泉はいう。例えば、デバイス試作用には耐圧が5~10Vでも良いはずで、SIMOX基板でも十分使えるはずだが、熱酸化膜に比べて悪いことを理由にして、回路を試作するだけの意味がないと言われたりした。

1994年には、泉は厚木のNTT LSI研究所ナノエレクトロニクス研究部の部長の職にあり、複数の研究グループを率いると同時に、コマツ電子金属(KEM)とNTTエレクトロニクス(NEL: NTTグループ会社の一つ。泉はNEL出向も兼務)とが共同で推進していたSIMOX基板実用化プロジェクトの研究技術面での責任者も兼務していた。SIMOX基板の高品質化、とくに埋込酸化膜の膜質向上、膜厚拡大が大きなテーマであった。

ある日、単電子デバイス用プロセス技術の開発を目指して、SIMOX基板を熱酸化して極微Si粒を残す検討をしていた高橋庸夫が、極小パターンによるSi領域下部の埋込酸化膜が厚くなっているようだと言った。不可解な現象として実験条件等の詳細な説明を聞いていくうちに、酸素が上部Siを拡散して埋込酸化膜上部に達し、そこで滞留しているうちに酸化されたことによると泉は直感した。極小パターンの外側からの酸素の回り込みでは説明がつかない。この現象究明を行い、効果的なプロセスに仕上げ、ITOX(Internal Thermal

Oxidation)技術が生まれた<sup>5</sup>。

すなわち、低ドーズ酸素イオン注入の後で、通常通り、内部の埋込酸化膜の層を形成するために不活性ガスを流しながら

熱処理を行うが、その後さらに酸化性ガスを流しながら熱処理すると、図7のように、基板表

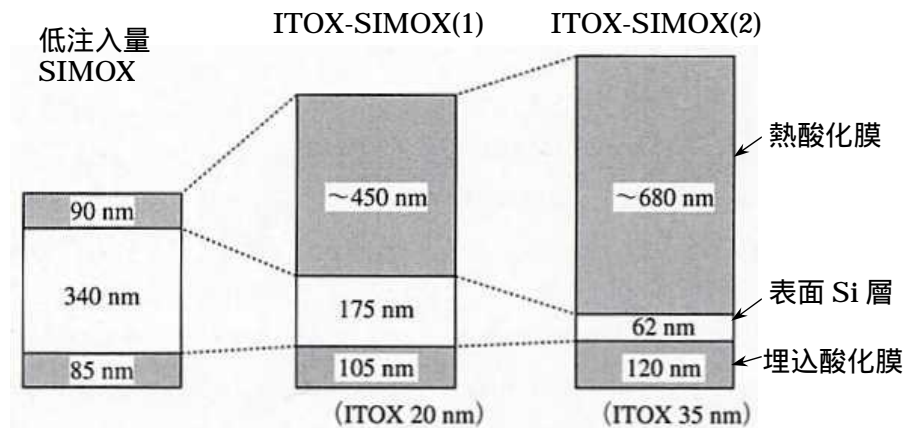


図7 ITOX プロセスによる各層の厚さの変化

<sup>4</sup> S. Nakashima and K. Izumi, Nucl. Instr. Meth. B55(1991)847-851.

面にも当然酸化膜が形成されるが、基板内部の埋込酸化膜も膜厚が増加する<sup>6</sup>。この処理の結果、埋込酸化膜の絶縁耐圧、界面平坦性の改善、さらに、極薄 SOI 層の形成容易などの効果も得られた。

当時、NTT から NEL に完全出向の形で、NEL-KEM のプロジェクト要員を務めていた中嶋定夫は、KEM からの 4~5 人の派遣研究者をよく指揮して実験を積み重ね、ITOX 技術の現象論をまとめて、実用化技術レベルにまで押し上げた立役者である。

ITOX はコマツ電子金属が商標登録した。そのとき、SIMOX もと思ったが、SIMOX は、商標登録したくても、最初の発表以来何年も経っていても遅いと弁理士に言われた。実は、1984 年頃に、SIMOX を登録しようとしたのだが、当時の上層部は必要性を認めてくれなかったのである。

## 米国からの「外圧」をきっかけに装置開発

前述のように、1983 年に、米国からの資材調達、市場開放の要求に従って、電電公社が米国企業と共同開発および共同研究をしなければならないということになった。

このとき、酸素イオン注入装置の日米共同開発構想を上申し、これが当たった。1983 年当時、米国が電電公社に突きつけた要求 5 項目のうち、「共同開発」と「共同研究」の 2 つの項目で SIMOX が採用されるという幸運に恵まれた。1 つは、イートン社との、「100mA 級大電流酸素イオン注入装置」の「共同開発」である。装置開発では非常に大きな力になった。もう 1 つは SIMOX 基板とデバイス応用の「共同研究」で、モトローラ、TI、日本電気、三菱電機が相手で、いずれも NTT と各社との 2 者間の共同研究の形を取った。はじめは、米国の 1 社、Motorola だけを想定していたが、1 社だけではだめとの幹部の判断で 2 社になり、国内外バランスの観点から最終的には日本電気と三菱電機も追加された。

その後、電電ファミリー解体という方針になって色々な契約が多数解約されたが、SIMOX は、始めた事情が特別だったので解約されることなく結局 4 年間続いた。最後の 1 年は共同研究相手側からの強い延長希望に応じた結果である。

## 社内研究管理部門での経験が生きたプロジェクト運営

このようなプロジェクトの根回しなどのコツは、1979 年から 2 年間勤務した電電公社研究開発本部での経験が非常に役に立ったと泉は言う。組織の動かし方、事前に布石を打っておくやり方、上司の説得方法などである。

泉は、研究開発本部の勤務から研究所に戻ったとき、他に n-MOS の研究室があったにもかかわらず、バイポーラの研究室に配属になった。希望したわけではないのにバイポーラの研究室に配属された理由はよく分からないと泉は振り返る。

---

<sup>5</sup> S. Nakashima and K. Izumi, J. Mater. Res. 7(1992)788-790.

しかも、研究開発本部に行く前に使っていたイオン注入装置は他の人の管理になっており、一緒にやっていたメンバーも別のテーマになっていた。また、バイポーラの研究室ということで、Si 基板の方位は(111)が使われていた。CMOS は(100)なので、熱処理条件なども異なっているのだが、研究室の標準プロセスでは面方位の違いを考慮してもらえないなどの不都合があり苦労したという。

このとき、酸化膜、LOCOS、デバイス設計などを経験していた大村泰久が電子回路研究室から移ってきて、大村と2人でSIMOXを担当することになった。

このような悪条件の中、大村は1KSRAMの設計などで大きな力を発揮した。その成果が認められてメンバーの増員も認められ、中嶋定夫がSIMOXのグループに配属になった。

このような状況において、SIMOX製作に適した専用のイオン注入装置を作るのに絶好の機会だと考えて、泉は前述の日米共同開発、共同研究に立候補しようとしたわけである。

## ボストン郊外へ頻繁に往復するなど日米共同プロジェクト運営の苦労

問題の第一は、所属していた部の部長が日米共同開発提案の幹部への上申に反対であり、ことあるごとに対立したことであった。部長の出身の研究室では、SOI技術の一つであるFIPOS(Full Isolation by Porous Oxidized Silicon)技術を開発しており、それが尾を引いたのではないかと、泉は推測している。

問題の第二は、イートン社との共同開発に関わる折衝において、当事者能力が組織的には無い状態で事に臨まざるを得なかったことである。最終的な判断は、所長の上の研究開発本部長の責任という形であったから、いちいち部長を通して所長に伺いを立てるため、相手側からは不審の目で見られたし、結論が遅れて困ったこともたびたびあったという。

イートン社は、大型トラックのディファレンシャルギアやエンジンを中心とするコングロマリットであったが、新規事業開発ということで、イオン注入装置開発を始めた。イートン社は結局、SIMOX関連の事業から手を引いたのだが、イートンからスピンアウトしたMIT出身のマイク・グエラーがIbis社を設立してイートンから装置を買ってSIMOX基板の製造販売を行い、その後装置も作るようになった。

Ibis社は、米国政府から補助金をもらっていた。SOIデバイスは宇宙線に強いということで、軍事技術に指定されていた関係だろうと泉は推測する。SIMOX基板を使ったLSIがスペースシャトルのコロンビア号にも使われたという。

問題の第三は、電電公社は海外メーカーと共同開発を実施したことがないので、当時の内規との整合を取るのが極めて困難であったことである。共同開発、共同研究というコンセプト自体が無かったので、そのための伝票類も無くて、すべて発注書の形にせざるを得なかった。

---

<sup>6</sup> 「SOIの科学」、リアライズ社(2000年4月)p.11.

また、共同開発に関わる協定書の類まで、弁護士と相談しながら自分で起案せざるを得ず、英語版の作成も含めて一つ一つ自分で作った。英語版の協定書はこのときのものが NTT として初めてのものであり、日本語版と両方作って双方を正本とした。共同開発に関わる協定書をひな形にして共同研究の方も泉が書類を作った。

3 ヶ月ごとに、会合して進展状況を確認し、次のステップに進むか否かを判断して、それまでの分を試作発注の形で支払った。イートン社には、年度の最後に払うことになっているので、その間は、丸紅エレクトロニクスに入ってもらい、まとめて支払ってもらった。

結局、プロトタイプ機に約4億円、実用機に約4億円かかった。プロト機は実用機に向けた性能試験のため現地で納入という形をとり、性能試験で消耗しきったため現地で廃棄することで事務部門を納得させた。実用機の納入は1986年で、NTTに納入してからも、何千万円もかけて改造を行った。このころ、真藤恒が電電公社総裁(後に NTT 社長)になって「新規技術のための装置は、納入したその日から改良改善が始まるものだ」と言ってくれたので助かったという。同じような装置をイートン社に注文した他社は追加スペックを満足するまで現地でやらせたので、納入がかなり遅れたという。

イートン社の開発拠点はボストン郊外のピバリーにあり、大変遠かったので、関係者との意識合わせや意気投合するまでに苦労した。現場の視察に行っても、現場の開発技術者に直接伝えることは許されなかったので、中間マネージャを通して伝達し、理解してもらって作業してもらうのに苦労した。泉は1年に5~6回くらい現場に行き、それぞれ10日~20日現地に滞在した。

技術者の雇用・労務管理において、日米間では慣行に大きな差があり、開発プロジェクトの進行管理において、クビを覚悟の決断の場面が度々生じた。また、米国の人間は、パーマメントの仕事と考えていないためどんどん辞めていくので、仕事が遅れるし、分かる人がいなくなってしまうといったことがしばしば起こった。

## 研究所のプロジェクトになった

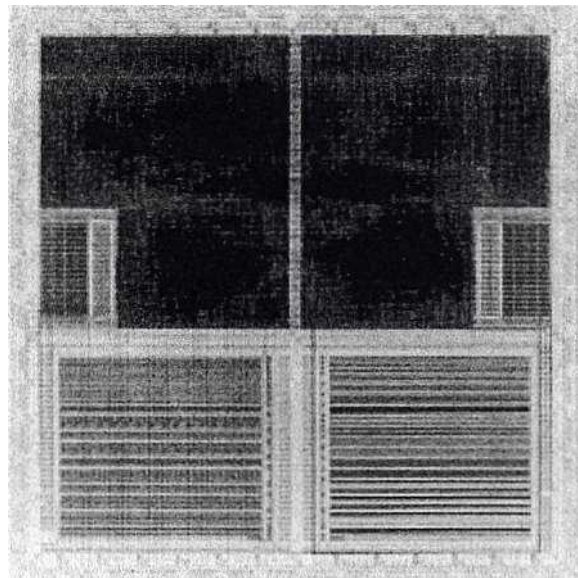


図8 SIMOX 基板を用いた  
300KG ゲートアレイ CMOS/LSI

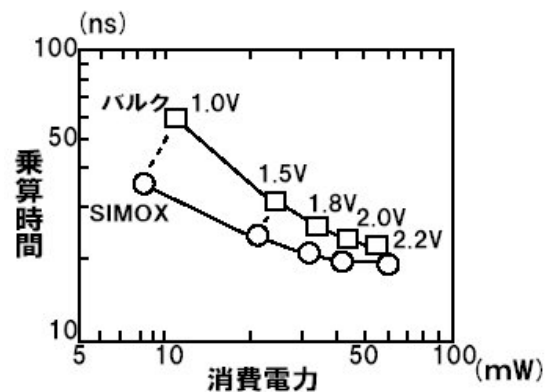


図9 乗算器(CMOS/SIMOX)の性能

## SIMOX による VLSI 開発

イートン社の実用機が納入されるころには、研究体制も拡充されており、仕事は順調に進んだ。1982年に2人で再開したグループが年末には中嶋が加わって3人となり、1983年の厚木移転の頃には5人に増えていた。

その後も順調に人が増えて、1995年には30人となり、さらにNTTのグループ会社であるNTTアドバンステクノロジー(NTT-AT)とNTTエレクトロニクス(NEL)からの派遣者を加えて合計約70人の体制になって、研究所の「プロジェクト・テーマ」になった。その成果は、設計寸法 $0.25\mu\text{m}$ のVLSIの完成であり、大々的に発表した<sup>7</sup>。これは、その後 $0.2\mu\text{m}$ に縮小して仕上げた。図8がSIMOX基板を用いた設計寸法 $0.2\mu\text{m}$ の300KGゲートアレイCMOS/LSIである<sup>7</sup>。また、40Kゲートアレイ上に構成した乗算器LSIによって通常のバルク基板との性能比較をした結果を図9に示す<sup>8</sup>。通常のシリコン基板の場合にくらべてSIMOX基板を用いた場合には、高速化と低消費電力化が同時に実現されていることが分かる。

これらのSIMOX技術の研究開発成果によって、泉は、1983年と1992年には、NTT研究開発本部・本部長表彰を受けており、1994年には、科学技術庁長官賞、1996年には国際学会であるSSDMの1996 Awardを受賞した。

微細寸法MOSデバイスの動作は通常のシリコン基板よりもSOI基板の方が有利であり、既に1993年には、室温動作 $0.1\mu\text{m}$ ゲート長CMOS/SIMOXを実現していた。1992年12月にIEDMのパネルディスカッションの際、泉は $0.1\mu\text{m}$ のp-MOSとn-MOSが個別にはできるという話を事前の打ち合わせでしたところ、同じパネラーで微細デバイスの権威であるMITのAntoniadisも驚いて、「OHPを直さなくては」と言っていた。77Kに冷やしたチルドCMOSならばその数年前にできてはいたが室温動作のものはまだ難しかったのである。

## SIMOX 技術を広めてくれた人々

1987年頃に、東大の菅野卓雄教授と共同研究を行った。テーマはSOIデバイスの設計と試作であった。菅野研究室の大学院生が設計してCPUも作った。配線ミスがあってCPU自身は動作しなかったが、テスト用の回路は動作したのでSIMOX技術の有効性をアピールできた。この共同研究の成果を菅野教授が色々なところで紹介したので、「外部に応援者を作る」という結果になり、NTTの幹部に対しても良い効果をもたらした。

また、SIMOX研究開発のグループがつぶされかけたときに、共同研究相手のMotorola社長から幸運にもその重要性について、当時のNTT最高幹部に言及してもらったこともある。

SIMOX技術の応援者を増やすために、LETIのAuberton-Hervé(後のSOITEC社長)とも

<sup>7</sup> K. Izumi, Proc. 6<sup>th</sup> Internat. Symp. ULSI Sci. Tech., Electrochem. Soc., Proc. Vol. 97-3(1997)221-233.

<sup>8</sup> NTT技術ジャーナル, Vol. 11, No. 7(1999)95.

色々話をした。その結果、イートン社との共同開発の成果であるイオン注入機 NV-200 は NTT の他に LETI も購入し、合計 5 台売れた。

LETI では SIMOX で 32 ビットマイクロプロセッサを作って、これがエグゾセミサイルに搭載され、フォークランド紛争で使われたという。SIMOX 技術で作った VLSI が過酷な環境でも動作することを示す一つの例である。

## IBM が SOI 基板を採用して高性能プロセッサ「Cell」などを開発

1998 年に、IBM が SOI 基板を用いた High-end PowerPC の量産化を発表したことに触発され、AMD、Motorola、TI、三菱電機、東芝、あるいは沖電気など、大手半導体メーカーは相次いで SOI 基板を用いた LSI の量産計画を発表した。さらに、当初 SOI 基板に対して懐疑的な見解を示していた Intel が、2001 年の末になって、IBM が用いている部分空乏型 SOI 基板と比較してより高性能化が期待できる完全空乏型 SOI 基板を用いたトランジスタ特性を発表し、SOI 基板を高性能 LSI の必須の技術として採用する態度を明確にした。

また、2002 年はじめには SOI 基板を活用した最先端半導体プロセス技術を共同開発するためのソニー / IBM / 東芝の提携発表が行われた。この成果は、2005 年の高性能プロセッサ「Cell」の試作結果発表として結実した<sup>9</sup>。その試作チップは、90nm プロセスの SOI 技術を用いたもので、221mm<sup>2</sup> のチップ面積に 2 億 3 千個以上のトランジスタを搭載している。

その他の具体的な製品としては、2000 年に、三菱電機が高速通信用 LSI を商品化し、2001 年には、沖電気が低消費電力化を目指して時計用 LSI に SOI 基板を採用し商品化した。また、2002 年にはモトローラが、2003 年には AMD がハイエンドマイクロプロセッサに SOI 基板を採用した。

このように、SIMOX 技術の開発によって実用化の扉が開かれた薄膜 SOI 基板を用いた LSI は高速化や低消費電力化のための決め手として、次々

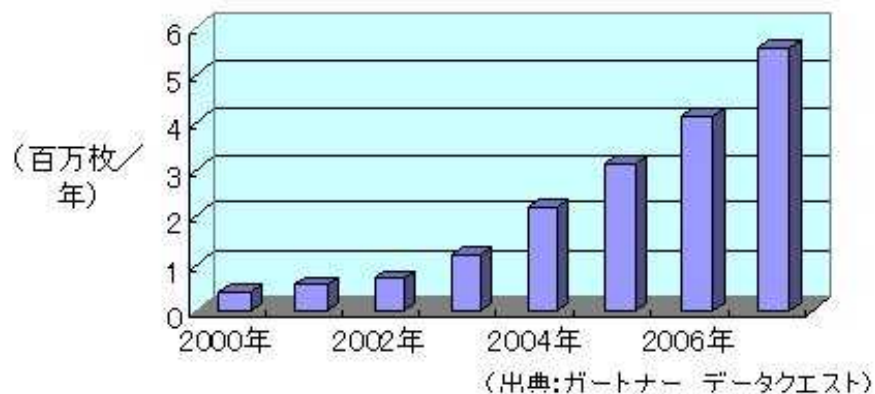


図10 SOI 基板の需要予測(8 インチ換算)

に商品化が進められており、今後の LSI の開発動向に大きな影響を与えるものとなっている。図 10 に示すように、SOI 基板の需要予測もこのような状況を反映して、2001 年から 2007 年ま

<sup>9</sup> <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200502/05-0208A/>



で年平均 47%という高い成長率で拡大するとされている<sup>10</sup>。

## 夢・意欲・激励・応援 - SIMOX 技術開発の成功要因

成功要因の第一は、興味を夢につなぎ、その夢を実現する意欲を失わなかったことだが、要因の第二は、インキュベーション段階において、権限ある上司(有吉室長)が部下の夢に相乗りして引き上げ、組織内外圧をはねのけて夢の実現に手を貸したことだ、と泉は述懐する。他の研究室の幹部の中には、酸素を使ったら 5 千万円もするイオン注入装置が燃えてしまうから中止しろ、という人もいた中で大きな支えになってくれた。

要因の第三は、電電公社という組織の外に SIMOX の応援者を得るようにして、電電公社の研究開発本部および通信研究所の幹部に対してその重要性を外部から知らしめる戦略が功を奏したことだろうと泉は振り返る。

## 大阪府立大学で SIMOX 技術の新展開

泉は、1999 年に大阪府立大学へ教授として移った。1998 年に、所長付きになって、技術移転の仕事を担当したが、研究開発に対する意欲が失せることはなかったのである。

現在の研究テーマの第 1 は、「電子-光融合デバイスの研究」である<sup>11</sup>。シリコンを素材とした超 LSI 技術の微細化限界を打破するため、演算には電子を使い、信号伝送には光を使って相乗効果を狙うのが基本的コンセプトである。

これを実現するため、SOI 技術を基盤技術とし、局所的に表面 Si 層を単結晶 SiC に変成させ、その上部に GaN をヘテロエピ成長させ、この部分に青色 LED をモノリシックに作り込み、超高速・超省電力高性能をもつ電子-光融合デバイスを実現する計画である。

新しいアイデアにじっくり取り組み、新たな分野を生み出そうとするエネルギーは、SIMOX 研究開発以来 30 年を経てもなお泉を突き動かしている。

---

<sup>10</sup> [http://www.gartner.co.jp/press/pr\\_20021002-01.html](http://www.gartner.co.jp/press/pr_20021002-01.html)

<sup>11</sup> <http://tokachi.riast.osakafu-u.ac.jp/%7Eesentan3/home.html>

## 略歴

- 1970年 名古屋工業大学 第二部 電気工学科 卒業
- 1972年 名古屋工業大学大学院 工学研究科 電気工学専攻修士課程修了
- 1972年 日本電信電話公社入社
- 1983年 武蔵野電気通信研究所 研究専門調査役
- 1992年 LSI研究所 微細加工技術研究部・部長
- 1996年 システムエレクトロニクス研究所 主席研究員 第二プロジェクト・リーダー
- 1999年 大阪府立大学先端科学研究所・教授

## 主な受賞

- 電子通信学会 学術奨励賞、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞、NTT研究開発本部・本部長表彰(2回)、大阪府立大学 学長顕彰碑(2回)など受賞
- 1994年 科学技術庁長官賞
- 1996年 SSDM 96 Award
- 2001年 IEEE Daniel E. Noble Award