

マイクロエレクトロニクスの現状と動向

Trend of Microelectronics

マイクロエレクトロニクスは、今日社会生活と産業構造に極めて大きなインパクトをもつ技術となり、その状況は第二次産業革命とも呼ばれている。面積 1 cm^2 足らずのシリコンチップ上に、10万以上の素子を集積化した超LSIが64kビットのD-RAMを筆頭に市場へ登場し、更にその上をゆく32ビットマイクロコンピュータ、64kビットのS-RAM及び256kビットD-RAMの開発が目下活発に報じられている。その技術開発のすそ野は広大で、リソグラフィ技術をはじめ、電極配線材料、絶縁材料、それらの加工技術、不純物制御技術、無塵化技術、更にはCAD技術に及んでいる。

本論文はこれら技術の動向と課題を明らかにし、続いてGaAsデバイス、JJデバイスを未来の超高速素子として位置づけた。マイクロエレクトロニクスは20万画素の固体カラー撮像素子の実現など、トランスデューサの飛躍をもたらし、その影響力はエネルギー、宇宙など将来の我が国に大きな意味をもつ分野の技術開発にも及びつつある。

武田康嗣* Yasutsugu Takeda

牧本次生** Tsugio Makimoto

久保征治* Masaharu Kubo

1 緒 言

マイクロエレクトロニクス技術は、幅広い産業分野とかわり合いを保ちながら発展を続けてきた。その推移は3年に4倍の集積度の向上という数字で示されるとおりの勢いである。

本論文はまず、今日超LSIと呼ばれる素子を代表するメモリ、マイクロコンピュータの現状と発展動向を分析し、合わせてその発展を支えるプロセス関連技術、CAD(Computer Aided Design)技術の重点課題を整理した。更に将来のマイクロエレクトロニクス技術の一翼を担う新デバイスの位置づけについて示した。

2 マイクロエレクトロニクスのインパクト

トランジスタの発明以来およそ35年を経て、集積回路はいよいよ超LSI時代へと突入した。この間、メモリ及びマイクロコンピュータの出現などの技術革新とともに、応用面の開拓が相次ぎ、マイクロエレクトロニクス技術は社会生活と産業構造に対し大きなインパクトを与えている。過去数年の阜近な例を取り上げてみても、(1)コンピュータ処理能力の飛躍的向上、(2)OA(オフィスオートメーション)、FA(ファクトリーオートメーション)機器の急速な普及、(3)時計産業構造の転換、(4)マイクロコンピュータによるエンジン制御などにみられるカーエレクトロニクス産業の台頭など、枚挙にいとまがない。このような状況は、第一次産業革命に対比されて第二次産業革命又はエレクトロニクス革命と呼ばれている¹⁾。

この革命の芽生えは、1947～1948年のトランジスタ発明と世界最初の電子計算機“ENIAC”の完成に見いだすことができる。以来、両技術が結びつき、一方の進歩が他方の進歩を促すポジティブフィードバックが成り立っている。当時“ENIAC”は重さ約30t、9m×15mの設置面積を占め、150kWの電力を使った¹⁾。その処理能力は現在のシングルチップマイクロコンピュータとほぼ同等であり、この一事から、過去35年間の技術の進歩がいかに早かったかを知ることができる。そのテンポはなお衰えるところを知らず、現在から将来にわたって社

会に大きなインパクトを与え続けるであろう。

3 超LSI素子とその動向

1チップ当たり10万素子以上を集積するLSIを超LSIと呼ぶ。この分野開拓の先駆けとなったMOS(Metal Oxide Semiconductor)メモリ、マイクロコンピュータを中心にその動向について記述する。

3.1 MOSメモリの動向

MOSメモリの大容量化は、目下3年間に4倍の割合で進んでおり、この勢いは当分続くものと予想される。図1はD-RAM(ダイナミックランダムアクセスメモリ)、S-RAM(スタティックランダムアクセスメモリ)の開発推移をマイクロコンピュータのそれと合わせて示したものである。D-RAMは蓄積容量に情報電荷を蓄える形式のメモリで周期的に再生書き込みを行なう必要があるが、極めて高集積化に適する。現在N-MOS(NチャネルMOS)技術による64kビット素子が量産中で、256kビット素子を開発中である²⁾。S-RAMはフリップフロップがメモリセルを形成するもので、高速で使いやすいのが特長である。特に、メモリアレイにN-MOSを、周辺駆動回路にC-MOS(Complementary MOS)を使うアプローチが、高速・低消費電力の利点があるため重要視されている³⁾。現在16kビットが量産中で、64kビットが開発されている。

今後更に小面積セル設計を可能にさせる各種の素子構造や回路構成上の工夫により、1チップ当たり100万素子を超える本格的超LSIが出現するのもそれほど遠くないと考えられる。

3.2 マイクロコンピュータの動向

マイクロコンピュータは1971年に出現して以来、各種装置・部品の智能化を実現し、産業界へのエレクトロニクス革命の浸透に大きな役割を果たしてきた。その集積度は図2に見られるように、メモリと同様3年間に4倍の進歩を遂げ、他方スピードは3年間に2倍の割合で上昇している。

* 日立製作所中央研究所 工学博士 ** 日立製作所武蔵工場 工学博士

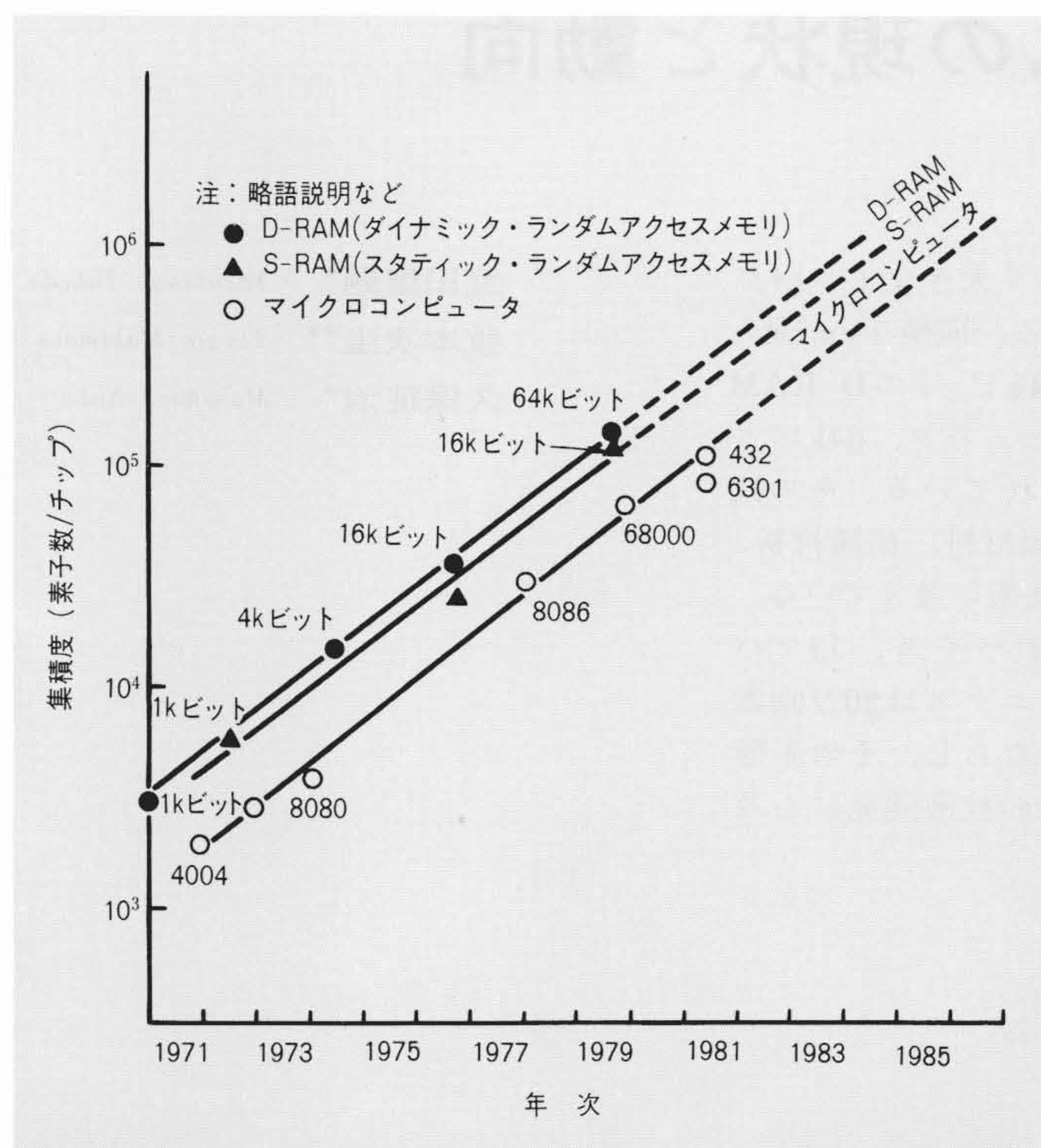


図1 LSI集積度の年次推移 MOSメモリ(D-RAM, S-RAM)及びマイクロコンピュータを代表例として、集積度の年次推移を示した。3年間に4倍の集積度向上が認められる。1チップ当たりの素子数 10^5 以上を越LSIと呼ぶ。なお、プロットは素子のサンプル供試開始時点で行なった。

マイクロコンピュータはその応用分野の性格から、図2に示すように3極化の傾向にある。第1は家庭用電気品・民生応用を中心とした低価格・多機能性を特徴とするシングルチップ・マイクロコンピュータである。不揮発性メモリやアナログ回路を取り込む多機能回路のオンチップ化、C-MOS技術による低消費電力化がポイントとなりつつある。第2は高性能汎用マイクロコンピュータと呼ばれ、メモリ、I/O(入出力装置)などを外付けとしたマルチチップ構成を特徴としている。短チャネル化による高速論理回路がその基本である。最近では32ビットマイクロコンピュータが発表されつつある⁴⁾。第3は音声・画像などのデジタル信号処理を行なう高速信号処理プロセッサである⁵⁾。これは、上記第1、第2の二つに加えて、最近誕生した注目すべきマイクロコンピュータである。アーキテクチャと特殊処理の高速化にポイントがある。

マイクロコンピュータの今後の展開を考えると、下記技術動向が予測できるであろう。すなわち(1)短チャネルMOS技術を中心とする高集積・高速化、(2)C-MOS技術による低消費電力化、(3)効率の良いオペレーティングシステムと高級言語の開発である。同時に、設計効率・検査効率の高い論理設計技術が追求される分野である。

以上MOSメモリとマイクロコンピュータの動向について述べたが、このほかにも、高速コンピュータ用のバイポーラメモリ及び論理LSIも、その高速性を特徴とする着実な進歩を遂げている。また家庭用電気品・産業用のアナログLSI及びアナログ・デジタル混在のLSIも集積度と性能向上が図られている。

更に、顧客の多様なニーズに迅速にこたえるため、MOS及びバイポーラによるゲートアレイLSIが今後ますます発展するものと考えられる。

4 超LSIを支える技術

前章で述べたように、LSIの集積度は3年間で4倍の割合で進歩しているが、それを支える土台としてパターンの微細化、チップの大面積化を可能にさせる製造プロセス技術がある。製造プロセス技術の革新は、また製造装置の進歩と密接なかかわり合いをもつ。

ウェーハ処理工程での基本技術の第一は、微細パターンの形成工程である。LSIの設計情報をもとにSi(シリコン)ウェーハ上に微細パターンを露光する手順を、図3に示す。超LSIの最初の製品と言われる64kビットのD-RAMなどの $3\mu\text{m}$ レベルの製品では、光による密着露光又は1:1投影露光によるパターン露光が行なわれている。256kビットD-RAMなどの現在開発途上の $2\mu\text{m}$ レベルの製品には、光による縮小投影法技術やDeep UV(Deep Ultraviolet)による露光技術などが採用される可能性が強い。一方、電子線描画技術は、レチクル及びマスクの製作には既に実用化されている。フレキシブルにパターンを発生できる特徴を生かして、特殊応用又はゲートアレイ用のLSIの工程に電子線による直接描画技術が有望と考えられる。更に、 $1\mu\text{m}$ 以下の超微細パターンの形成を目指してX線による露光技術の研究開発が進められている。

パターン形成技術に見合うデバイス構造、材料及びその加工技術も重要である。最近LOCOS(Local Oxidation of Silicon)に代わる新しい素子分離技術の検討や、多結晶Siに代わる金属けい化合物など低抵抗材料の検討が活発に進められている。微細加工法は、等方的なウェットエッチングから、反応性イオン及びラジカルによる異方性ドライエッチングへと移行している。

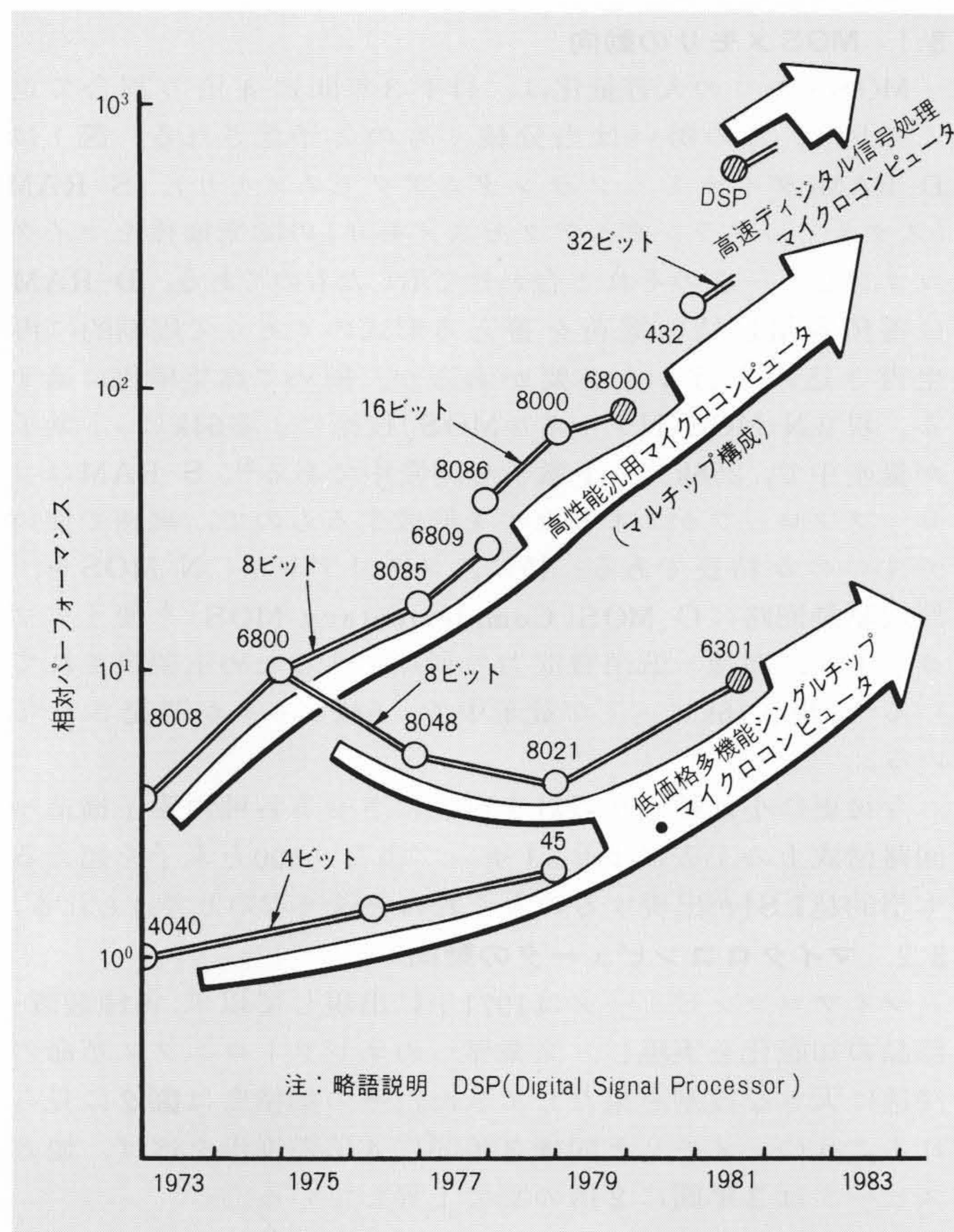


図2 マイクロコンピュータの発展状況 マイクロコンピュータの今日までの発展過程と今後の3極化の動向を示す。低価格多機能シングルチップ形、汎用マルチチップ形及び高速信号処理プロセッサである。

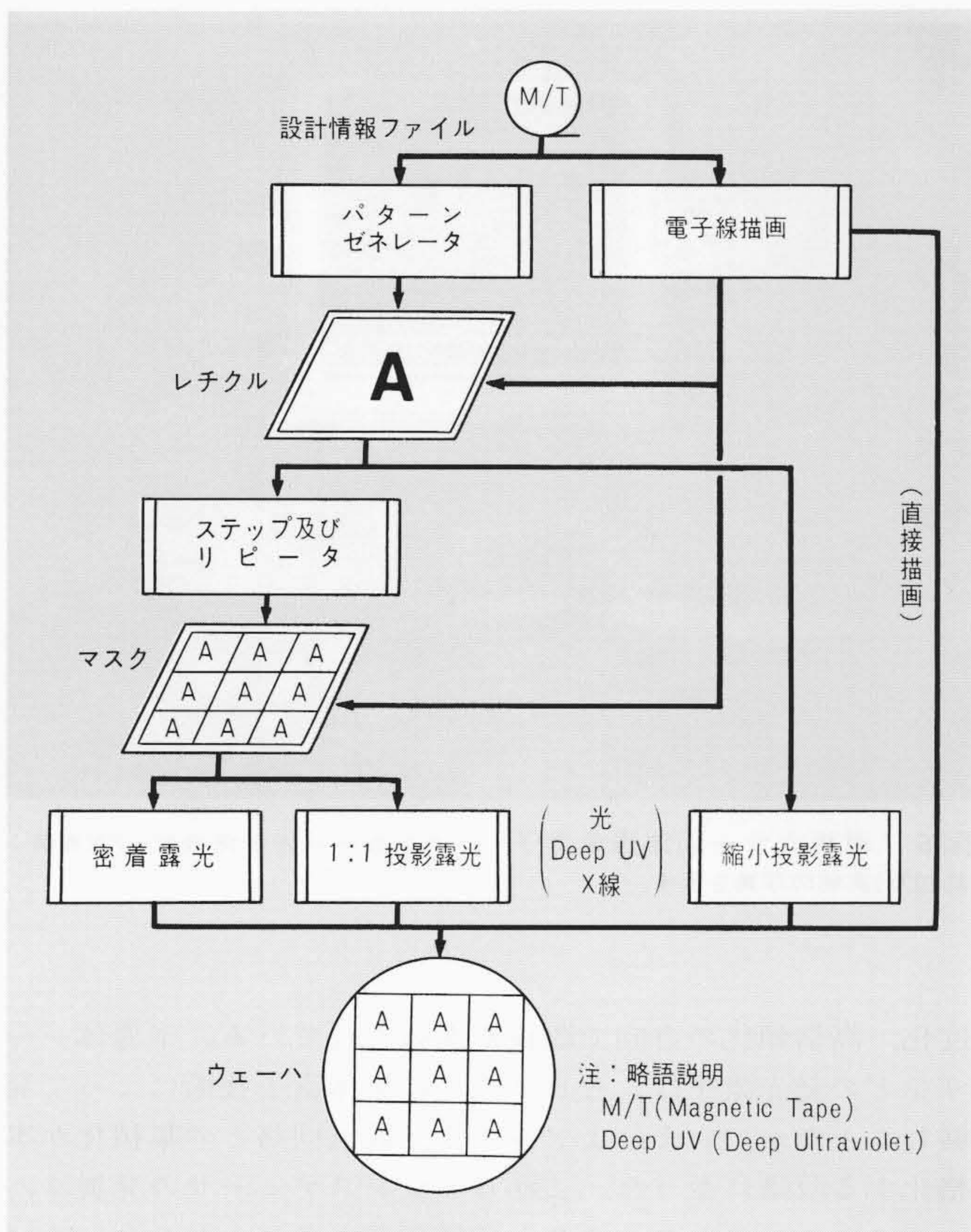


図3 設計情報からウェーハ上へのパターン形成までの過程
微細パターン形成技術は、半導体プロセスのかなめである。密着露光、1:1投影露光、縮小投影露光及び電子線描画技術の相互関係について示した。

チップの大面积化には、クリーン化技術が不可欠である。一般に最小パターン寸法の $\frac{1}{10}$ の大きさの塵埃が問題となる。現段階では量産工程で $0.3\mu\text{m}$ 以上の径の塵埃を問題にすればよいが、 $1\mu\text{m}$ レベルのプロセスを目指す開発では $0.1\mu\text{m}$ の大きさまで考慮する必要がある。したがって、無塵化のためのプロセスの自動化技術が極めて重要になるとと思われる。

5 CAD技術

メモリ、マイクロコンピュータなどの超LSI素子の開発にCAD技術が重要であることは自明であるが、回路規模のいっそうの増大化傾向はCADシステム自体のレベル向上を強く求めている。

LSIの一般的な設計・製造工程と各工程で利用されるCADを図4に示す。同図は新規なプロセス、新規な論理を想定したカスタムLSIの開発工程である。また、超LSI時代に入って特にCADに対する高度化の要請の強い項目を表1に取りまとめて示す。

デバイスCADは、トランジスタなど素子の断面構造と不純物分布を基に、デバイスの特性を予測しようとするものである。素子の微細化が $2\mu\text{m}$ レベルから $1\mu\text{m}$ レベルへと進むとデバイスパラメータの測定そのものが困難となり、CADに依存せざるを得ない状況になってきている。一方、微細化の進展によってCADもより精密度が要求され、従来の2次元解法から高精度な3次元解法への発展が急務となってきている⁶⁾。

回路CADは、従来は数百トランジスタまでが限界で、しばしば部分回路の特性予測に使われてきたが、今後はチップ上の全体回路を一括シミュレーションすることが要求されてお

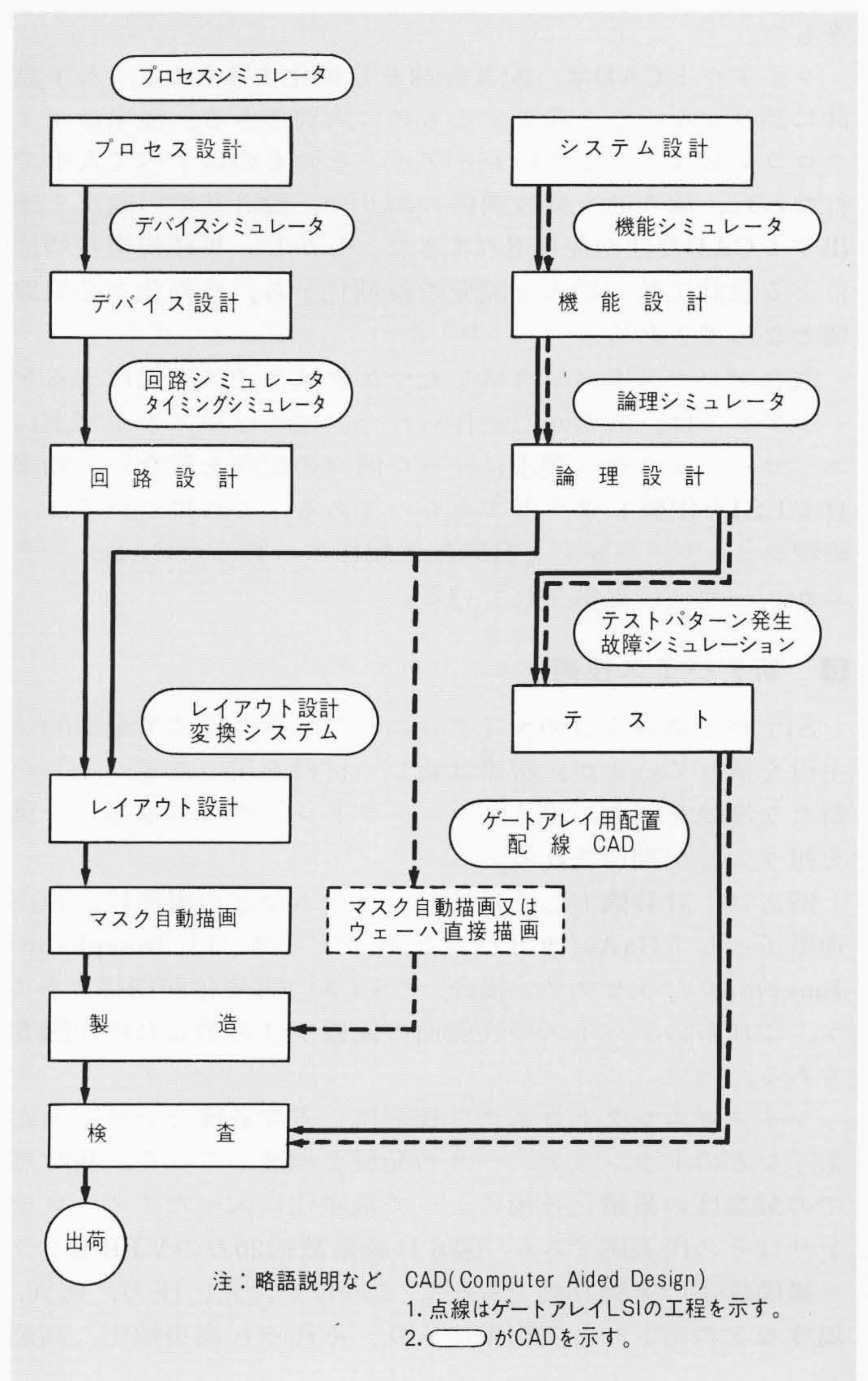


図4 LSI設計・製造工程とCAD LSI設計・製造のフローの中の各ステップに対応させて、必要なCAD技術を〇囲みで示した。また、セミカスタムLSIゲートアレイのフローも点線で記した。

表1 半導体CAD高度化のニーズ 素子の微細化に対応してデバイスCADの高度化が、LSIの大規模化に対応して回路、論理、レイアウト関係のCADの高度化が強く要請されている。

	項 目	ニ ー ズ
1	デバイスCAD	● $2\mu\text{m}$ ～ $1\mu\text{m}$ 素子への対応
2	回路CAD	● MOS超LSIメモリ、アナログ及びデジタル混在LSIなど、大形・複雑回路への対応。
3	トランジスタレベル論理CAD	● MOS論理回路用多値シミュレータの開発
4	レイアウト設計支援システム	● マイクロコンピュータ及び周辺LSIレイアウト設計の自動化
5	CADのトータルシステム化	● ゲートアレイ(セミカスタムLSI)対応。将来はカスタムLSI用にも発展

り、そのための大規模化・高速化及びデバイスCADとの接続によるモデルの高精度化が課題となっている。

論理CADでは、従来の“0”、“1”に加えMOS回路特有の新しい論理値を導入したシミュレータが必要となってきている。CADのトータルシステム化の基礎になる重要な役割

をもつ。

レイアウトCADは、配置配線を自動化するものと、人手設計に誤りがないかを検証するものに大別できる。従来はマイクロコンピュータなどのレイアウトそのものはすべて人手で行なわれ、論理的な接続関係の誤りや、設計基準の違反を摘出するCADだけが使用されてきた。しかし、集積規模の増加による設計工数の増大と開発の長期化から、自動化が必須課題となってきた⁷⁾。

既存プロセスをベースにしたマスタスライス方式によるゲートアレイは、あらかじめ作られた共通のベースチップ上にユーザーのシステム要求に従った個々の配線を行ない、効率良くLSIを作製しようとするものである。これについては、論理シミュレーションと自動配置配線の一貫したCADシステムがユーザーに提供されている。

6 新デバイス技術

Siデバイスは今日のマイクロエレクトロニクスで全面的に主役を演じているが、将来は新しい材料を用いたデバイスが新たな境地を開き、マイクロエレクトロニクスの推進の一翼を担うことが期待される。

例えば、計算機もしくは通信システムなどの用途に、超高速素子としてGaAs(カリウムヒ素)デバイス、JJ(Josephson Junction: ジョセフソン接合)デバイスの実用化が期待できよう。これらのデバイスの性能面の位置づけを示したのが図5である。

マイクロエレクトロニクス技術は一方で各種センサ、発光素子などのトランスデューサの発展を加速している。現時点での最高度の集積化技術によって量産化に入ったイメージセンサはその代表例である。図6は画素数約20万のVTR用カラー撮像素子の実物写真である⁸⁾。このほか、光、圧力、磁気、温度などのセンサも実用期に入り、それぞれ高集積化、高感

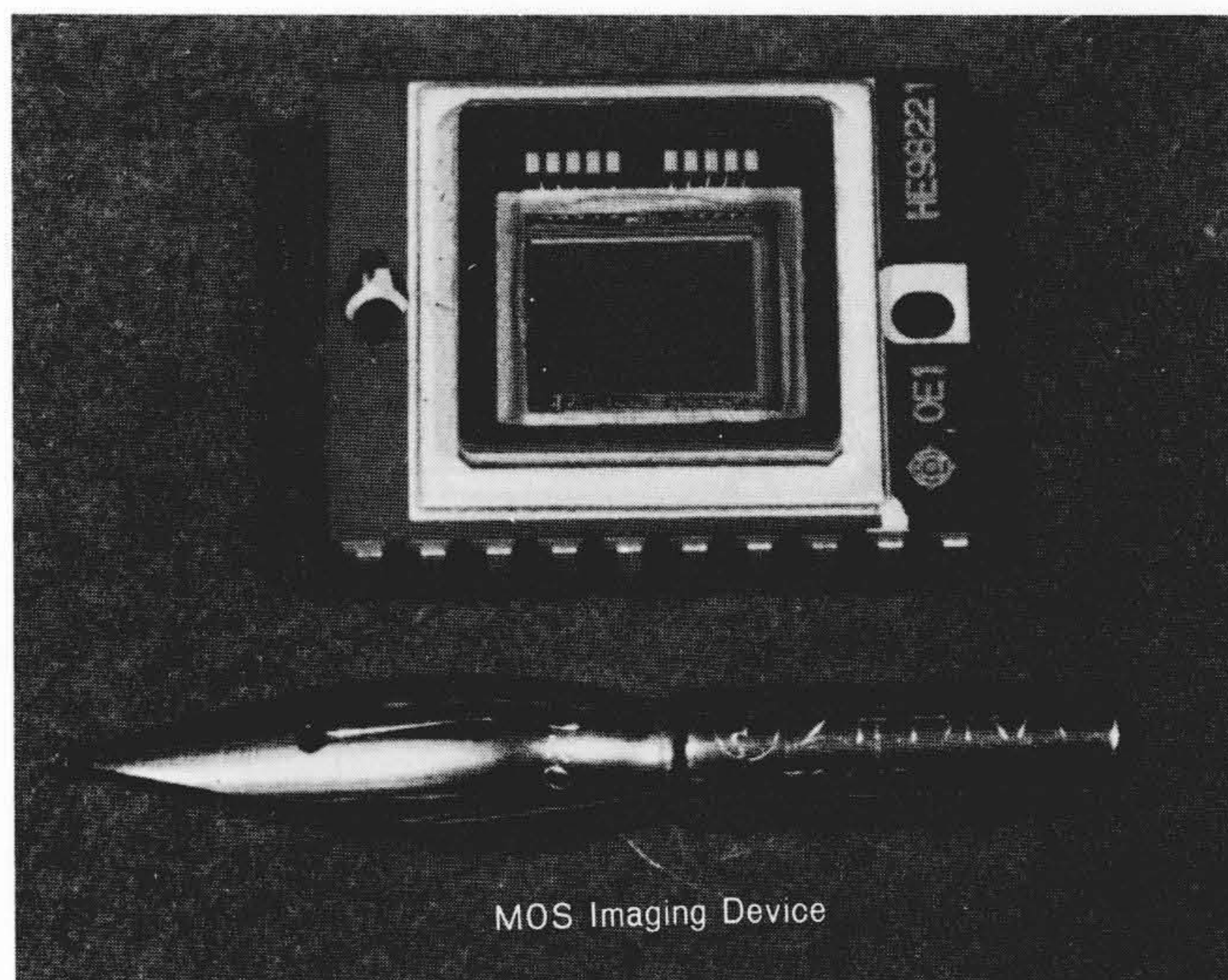


図6 単板カラー固体撮像素子 単板カラー固体撮像素子(画素数: 約20万)実物の写真を示す。

度化、高信頼化の方向で改良が進められている。半導体レーザーなどの発光素子は、今日まで主に単体素子技術によって発展してきたが、いよいよアレイ化、電気回路との集積化が本格化する段階に至った。これらトランスデューサの発展は、マイクロエレクトロニクスと各種産業とのかかわり合いをいっそう多彩なものとするに寄与すると思われる。

7 結 言

マイクロエレクトロニクス技術は、今後もあらゆる産業を活性化しながら多様な発展を続けるであろう。その影響は宇宙開発、エネルギー開発など我が国の将来を決定づける大きなテーマにも及ぶと思われる。しかし、技術の最先端の開発の前途には、過去には全く問題にしないできた物理的課題(例えばホットエレクトロンの振舞)もクローズアップされてきている。従来にも増して本格的な研究開発の努力が必要であることを認識しなければならない。

参考文献

- 1) J.Linvill, et al.: Intellectual and Economic Fuel for the Electronics Revolution, Science, 195, 1107~1113 (March, '77)
- 2) T.Mano, et al.: A 256k RAM Fabricated with Molybdenum Polysilicon Technology, ISSCC Digest of Technical Papers, 234~235 (Feb. '80)
- 3) O.Minato, et al.: A High Speed Low Power Hi-CMOS 4k Static RAM, IEEE Trans.ED, ED-26, No.6, 882~885 (June, '79)
- 4) J.W.Beyers, et al.: A 32b VLSI CPU Chip, ISSCC Digest of Technical Papers, 104~105 (Feb. '81)
- 5) J.R.Boddie: Digital Signal Processor Overview: The Device, Support Facilities, and Applications, The Bell System Technical Journal, 60, No. 7, 1431~1439 (Sept. '81)
- 6) 鳥谷部, 外: 半導体デバイス解析, 情報処理, 22, No. 8, 743~749 (Aug. '81)
- 7) 小沢: VLSIレイアウト設計における自動配置配線, 情報処理, 22, No. 8, 778~782 (Aug. '81)
- 8) M.Aoki, et al.: MOS Color Imaging Device, ISSCC Digest of Technical Papers, 26~27 (Feb. '80)

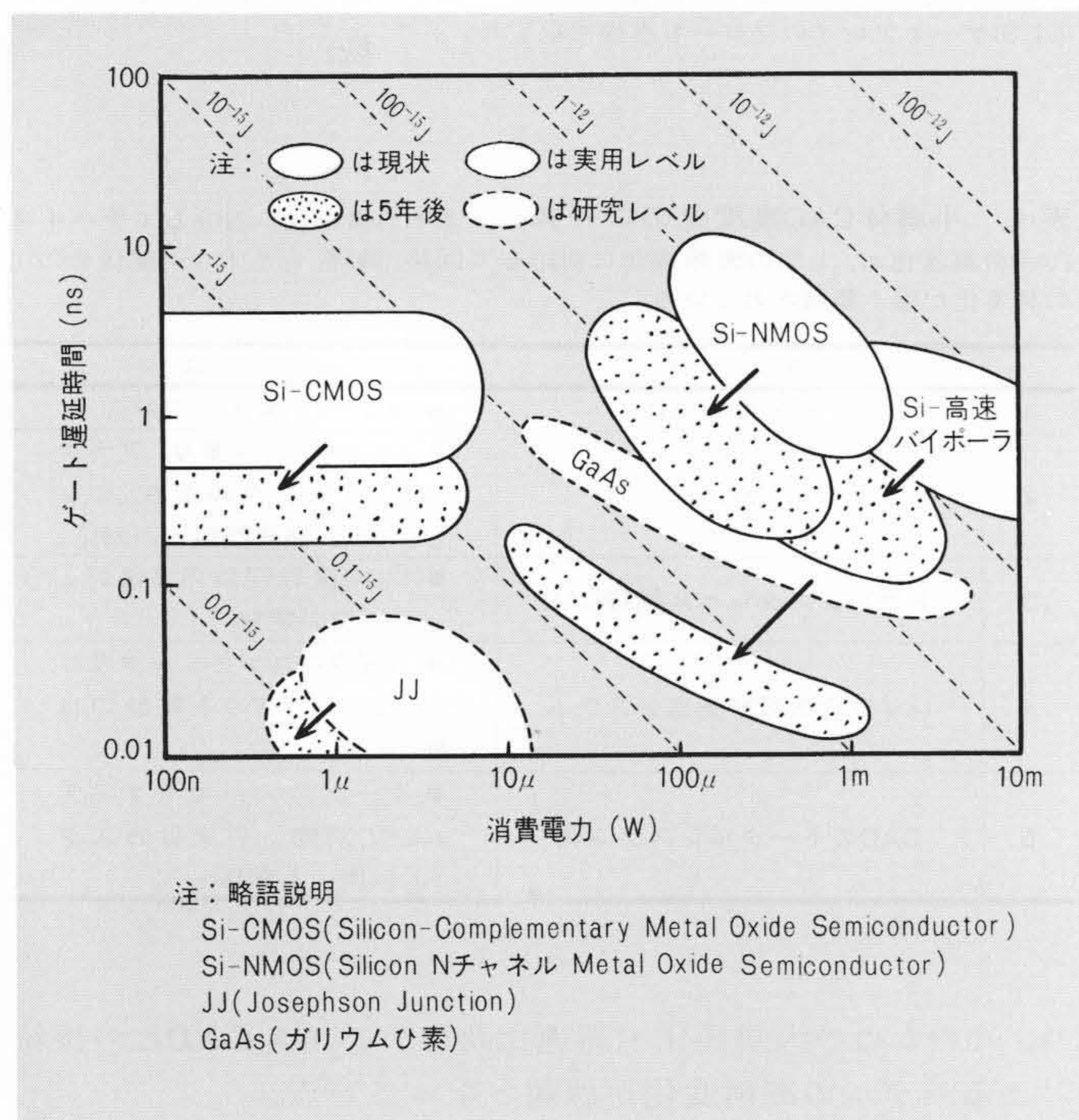


図5 ゲート遅延時間, 消費電力マップ上に見る新デバイスの役割 GaAs, JJ両デバイスの現状及び5年後の性能をSi-CMOS, Si-NMOS及びSi-高速バイポーラとの比較で示したものである。