

日立半導体集積回路の信頼性管理

Reliability Management of Hitachi Integrated Circuits

This article describes the reliability management of integrated circuits and some of the major problems involved, with discussions on reliability design, materials and parts control, process quality control and reliability testing.

久保陽一* Yôichi Kubo
大畑 潔** Kiyoshi Ôhata
松村皓司** Kôji Matsumura
鈴木秀明** Hideaki Suzuki

1 緒 言

信頼性管理活動は、顧客ニーズ、製品企画の段階から始まり、開発、製造、検査、使用および新規の要求に至る製品のライフサイクルを通じての一貫した継続活動であり、半導体メーカーとユーザーとの協調を含めたシステムマネジメントに基づいて運営されるべきものと理解している。

このような広範にわたる事項のうち、本稿ではバイポーラデジタル形集積回路を中心として、日立半導体集積回路の開発、生産における信頼性管理の要点と実施上の問題点について述べる。

2 開発品の信頼性設計と管理

半導体集積回路の開発、設計に際しては、顧客の信頼性要求、使用環境条件を明確化することと、素子のプロセス、構造設計、部品材料などに基づく表1に例示するような信頼性要因を的確に把握することに最大の努力を払っている。目標とする信頼性を効果的に実現し得るのは開発段階であり、次のような業務を設計者と信頼性エンジニアの協調体制のもとに進めている。

(1) 信頼性目標仕様の検討と計画作成
(2) 信頼性設計
(3) 信頼性の評価と実証
(4) 生産、使用の段階における考慮

特にLSI（大規模集積回路）化に伴って開発段階におけるユーザーとの密接な連携がきわめて重要となってきた。これは集積回路のシステム信頼性に与える影響が大きくなり、適切な信頼性トレードオフが要求されることおよび集積回路が特注の複雑なサブシステム化しつつあることによっている。

上記過程を通じて信頼性に関する設計基準が作成されており、複雑な機能のものでもすべてその範囲内で実現させるように管理し、新しいルールが必要になった場合は、信頼性、生産性などについて十分検討した後、追加されるようになっている。さらに部品、材料、チップ設計、製造プロセス設計、パッケージング、応用回路および品質管理にわたって、十分なデザインレビューが実施されるための基礎検討を進めている。

開発段階における集積回路の品質保証については、限定された認定試験、ロット保証試験のみに頼ることは効果が小さく、後述する量産品の主要管理手段にもなっている次の諸点を充実するように努めている。

(1) 部品、材料の受入基準の検討と管理

表1 バイポーラ デジタル形集積回路の信頼性要因 各プロセスにおける潜在欠陥と集積回路の故障モードとの関連を示す。

要 因	不良または故障の原因	モ ー ド
拡 散	拡散プロセス マスクアライメント マスク不良 ホトレジスト不良 表面汚染 取扱不良	初期電氣的特性不良 故障に関係することは少ない。
パッシベーション	酸化膜ピンホール クラック 汚 染	入出力逆電流増大 入出力耐圧低下
メタライゼーション	電流密度設計値に対する膜厚不足 オーミック コンタクト不良 蒸着工程の不適 汚染による水酸化物、酸化物生成 取扱不良	端子開放 電極短絡
ボンディング	ダイのクラック ボンディング接続不良 ワイヤのタッチ 金属間化合物生成 スクラッチ、ダメージの発生	端子開放 入出力レベル変化 間欠不良
異 物 混 入	微小異物混入	電極短絡、間欠不良
パ ッ ケ ー ジ	気密性不良 外部汚染	入出力逆電流増大、 耐圧低下、端子開放、 回路機能不良

- (2) 工程品質管理基準の確立と合否判定
(3) プロセス信頼性評価
(4) スクリーニング法の検討
(5) 製品検査基準の検討
(6) フィールド情報に基づく信頼性予測

プロセス信頼性評価は、特に新プロセス技術が適用された場合に有用で、たとえば、多層配線の層間絶縁性、スルーホール部または段差部の接続の信頼性などを重点的に検討するために、図1のようなテスト パターンを用いて信頼性評価を実施している。

既存製品のフィールド情報、特に故障モードとその発生割合、実装使用条件との関連を的確に把握することはきわめて重要なポイントと考えられるが、後述するように開発品の信頼性向上に役だつ形の良質なフィールド情報ははなはだ得にくいのが現状である。

* 日立製作所半導体事業部 ** 日立製作所武蔵工場

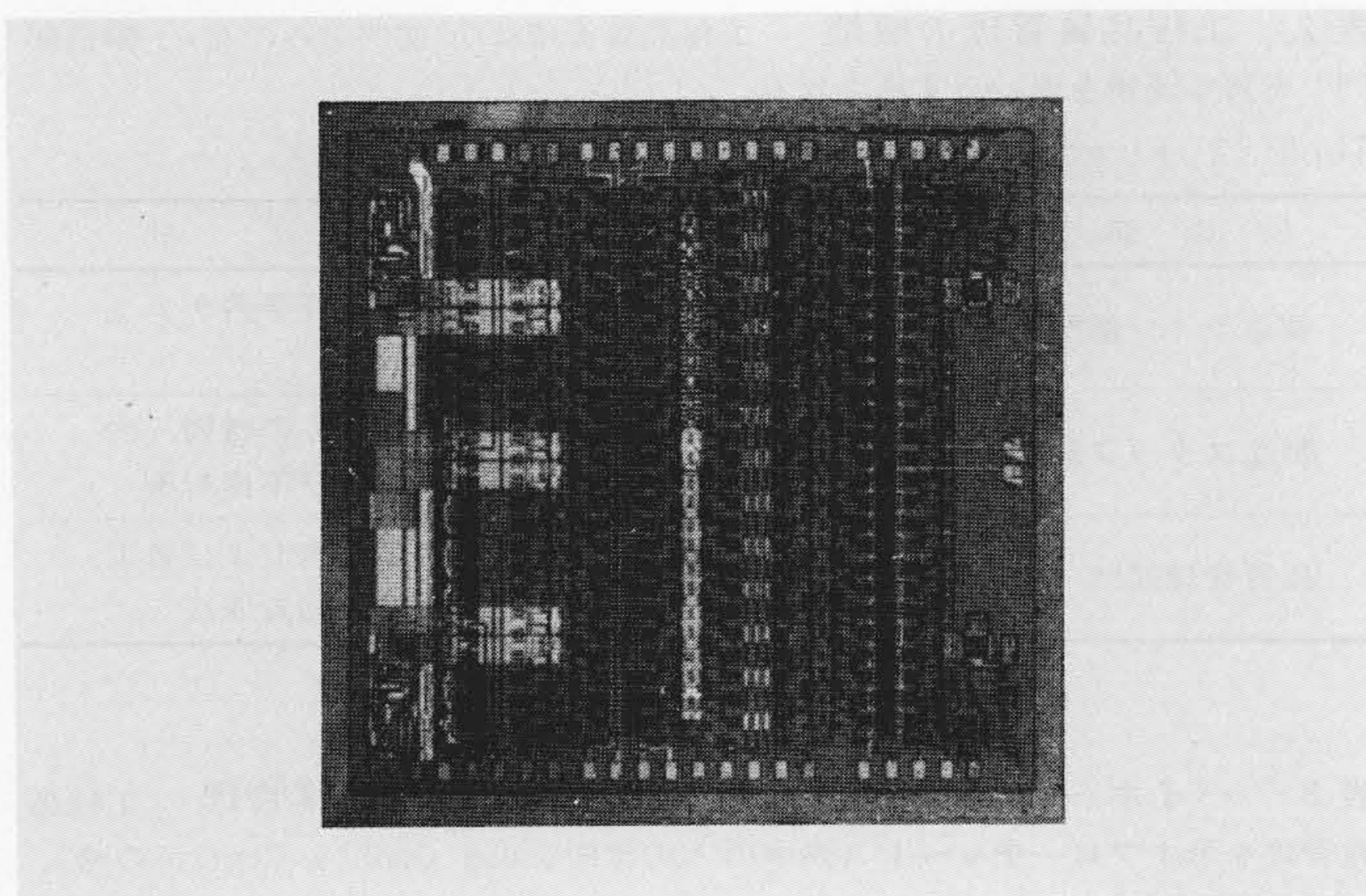


図1 バイポーラLSIプロセス評価パターンの例 多層配線における層間絶縁性、接続、蒸着配線の段差などをおもに検討するパターンの一例を示す。

Fig. 1 Example of Test Pattern for Multilevel Metalized Bipolar LSI

3 量産品の信頼性管理システム

量産品の信頼性保証のために実施されている主要な信頼性管理は、部品材料の品質管理、工程品質管理、信頼性試験の3点に要約される。

3.1 部品材料の品質管理

結晶、リードフレーム、ワイヤボンディング細線、セラミックなど製品を構成するための部品材料およびマスクパターン、薬品類のように製造プロセスで必要とする部品材料があり、いずれも集積回路の高密度化、高信頼化に伴って、品質管理の重要性が増してきている。部品材料の例は図2に示すとおりである。以下、セラミック封止の集積回路用部品材料について、重点検査項目および製造プロセスの主要チェックポイントについて述べる。

(1) シリコン単結晶およびウェーハ

素子の特性を左右する基本材料であるが、シリコン単結晶を切断、研磨した鏡面ウェーハおよびその上にシリコンを気相成長させたエピタキシャルウェーハが重要部品である。前者では表面の損傷、汚染、内部欠陥、平坦性および抵抗率などが重点検査項目であり、また後者においては積層欠陥、エピタキシャル層の厚さなどが重要である。

結晶の製造および加工においては品質はプロセス管理の徹底が必要で、単結晶製造装置の炉内ガスの純度、温度分布、また切断、研磨機における回転数や振動、特に鏡面研磨の際の塵埃、異物防止は重要ポイントとなっている。

エピタキシャル成長では、ガスの純度と流量管理が主要項目として挙げられる。

(2) マスクパターン

写真感光技術を利用しウェーハに回路を構成するために必要なマスクパターンについては、外観の欠陥数、寸法が重要ポイントであり、いずれも数ミクロンの大きさを検出せねばならぬことから、検査装置の高精度化が要求される。外観は顕微鏡や投影機が一般に使用されており、寸法関係は形状比較の原理を応用した比較顕微鏡、レーザを利用した 0.1μ まで測定可能な光波干渉式微小寸法測定器が開発され利用されている。図3は、比較顕微鏡を示すものである。

マスクパターンの品質保証のためには、プロセス技術の確立が重要であり、各種プリンタの機械的精度の向上、クリーンプロセスの確立が必須となっている。

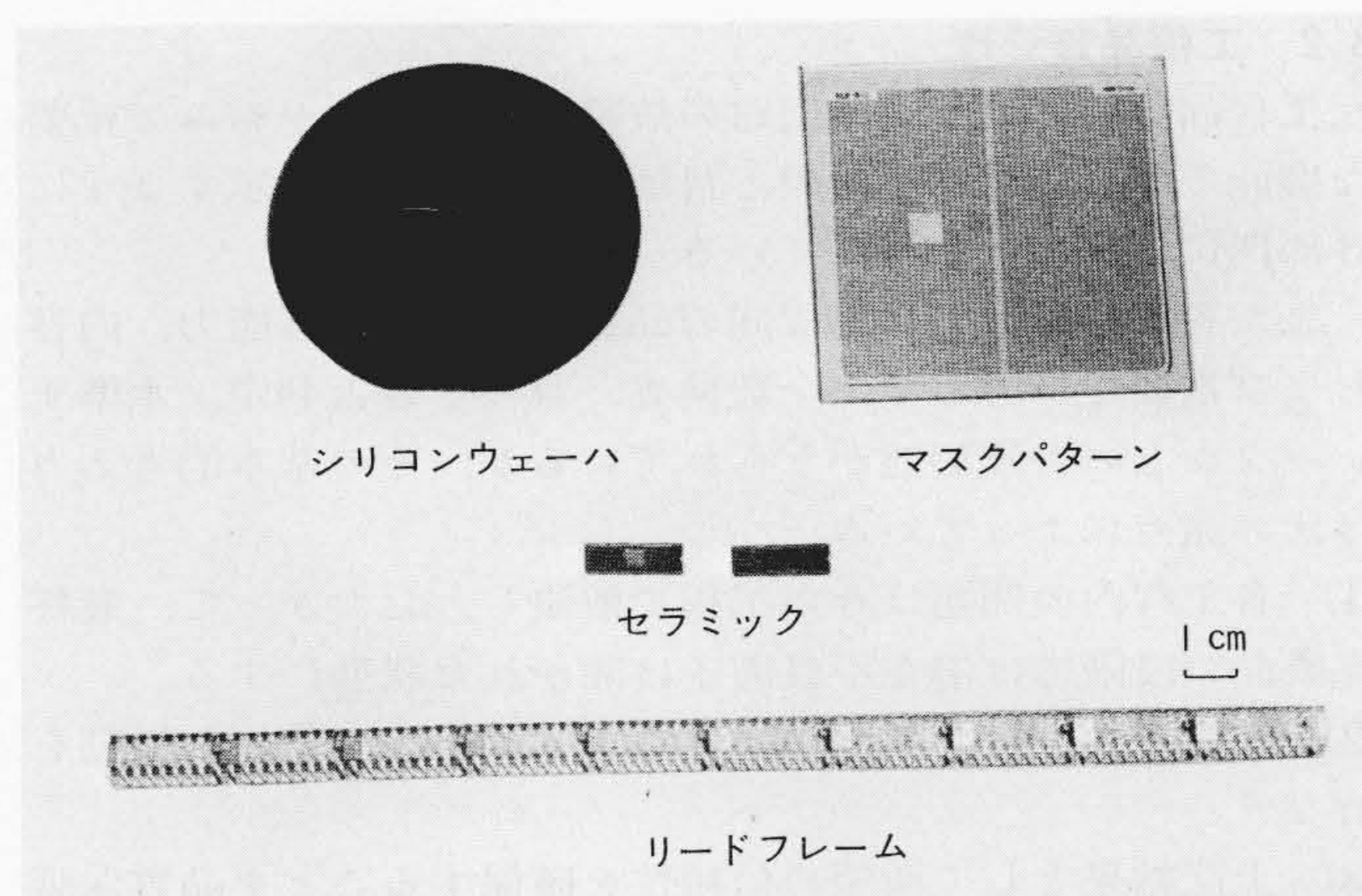


図2 集積回路に使用される部品材料の例 セラミック低融点ガラス封止形集積回路に使用される部品、材料を示す。

Fig. 2 Parts and Mask Pattern for Hermetically-sealed IC

(3) リードフレーム

コバールなどシリコンの熱膨張係数に近い鉄合金材料の、ワイヤボンディング部にアルミニウムを蒸着または接着した材料を、エッチングまたは打抜き加工で製造したリードフレームが使用されている。この部品はフレームの寸法、アルミニウム表面のボンディング性、清浄度および接着強度が重要ポイントといえる。表面のボンディング性を調べるためには、実装的な方法のほかにアルミニウムの硬度、表面の酸化膜などを測定する。一方、接着に関しては高温加熱テストが有効である。

(4) グレーズド セラミック部品

アルミナ焼結品に低融点の結晶性ガラスがコートされている部品で、リードフレームに素子を組み立てた後、本部品でガラスをろう材として封止するためのものである。重点検査項目はガラスの特性である。すなわち、ガラスの軟化と結晶化温度およびガラスの電気的特性、耐化学特性をチェックする必要がある。ガラスの軟化、結晶化温度の測定には、示差熱分析計を用いる方法が有効である。

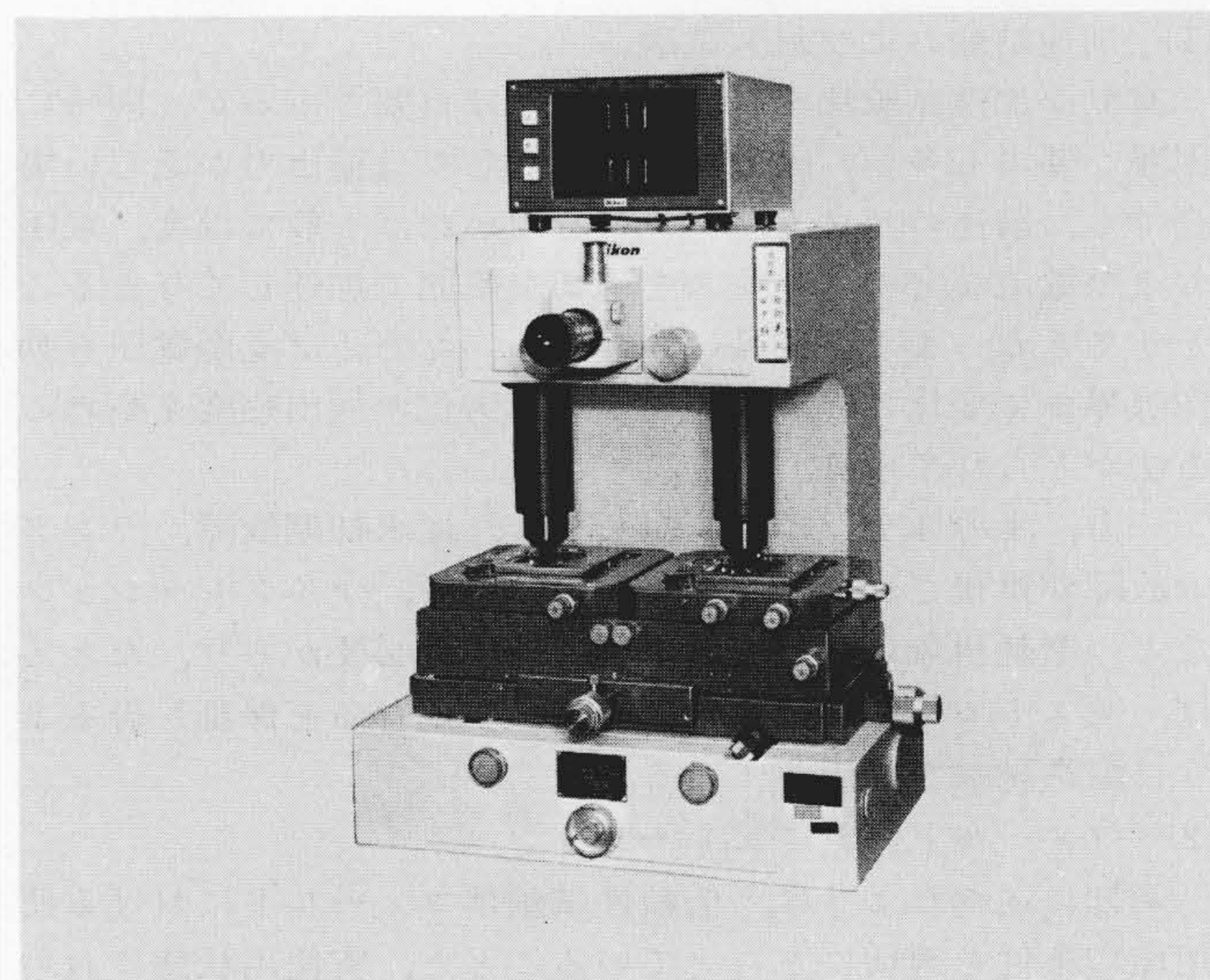


図3 比較顕微鏡 比較する2枚のマスクパターンを光学的に拡大し、同視野内で相互間の位置、寸法の関係を検査する装置。

Fig. 3 Comparison Measuring Microscope

3.2 工程品質管理

工程品質管理は、集積回路の故障モード配分からみて重要な機能となっており、対象と目的に応じて表2に示すように3部門によって行なわれている。

また各工程内および工程間の品質保証は、工程能力、内容および重要性に応じて、全数検査、ロット合否判定、水準チェックなどの管理形態がとられているが、その基本的考え方は次の諸点によっている。

- (1) 各工程内の問題はその工程で解決し、したがって、最終完成品の段階では潜在不良因子は除かれた状態にする。
- (2) 工程能力を良好な水準に保つようフィードバック活動を行なう。
- (3) 上記結果として所望の信頼性を確保することを品質保証の目的とする。

上記に基づきバイポーラ デジタルIC (集積回路) について実施されている工程品質管理の主要ポイントおよび管理のねらいをまとめたものを表3に示した。

次に工程品質管理の実例について述べる。
チップ内アルミニウム配線は酸化膜段差部の断面形状、ホトレジスト材料、エッチングなどの要因により段差部のアルミニウムの厚さにばらつきを生じ、故障につながるおそれがあるため、重要な管理ポイントになっている。その形状管理には走査形電子顕微鏡 (SEM) も用いられている。

ボンディングの信頼度も集積回路の主要故障要因の一つであり重視されねばならない。ボンダーの精度向上とあいまって、チップおよびフレームのボンディング部の表面状態、ボンディングの荷重、時間などの諸管理、さらにボンディング後の外観、引張強度について厳重な管理が行なわれ、常に最良の状態に保たれている。

3.3 信頼性試験

信頼性試験は、集積回路の使用条件と故障モードを想定して実施される。また可能なかぎり過去に得られたフィールド情報を有効活用することを意図して行なっている。表4は通常用いている試験方法と対象とする故障モードを示すものである。また図4は、高温動作寿命試験装置の一部を示すものである。

次に信頼性試験の実施に際して、特に留意している事項について述べる。

- (1) 加速試験および耐久試験
有効な加速試験法を確立することは重要であるが、同時に困難な要素も多い。完成品を対象としては検出力が乏しい場合でも、前述のテストパターンを用いれば一般に温度、電圧および電流などのストレスを適切な範囲で加速して与えることができる。また完成品についても、たとえば電源電圧を動作限界まで変化させることにより、劣化の検出感度を高める方法がとられている。

一方、半導体デバイスに対しては、従来初期故障、ランダム故障が重視されてきたが、材料の疲労、マイグレーションなどの摩耗現象についても十分留意する必要がある、たとえば、熱ストレス試験の場合にもいわゆる寿命を保証し得るように耐久試験を適用している。

- (2) フィールドのシミュレーション
頭初に述べたように、信頼性試験はフィールドにおける使用環境条件を適切にとらえていることと、実使用状態において問題になる故障モードを主対象とすることが生命である。前者については、特に実装条件、使用環境を把握することが重要であり、後者については過去のフィールドデータを活用

表2 工程品質管理の機能 工程品質管理はQC部門のみでなく、製造部門と密接な連携を保って実施される。

Table 2 Functions of Process Quality Control

担 当 部 門	対 象	目 的
製造ライン部門	機械、装置、作業 者	正しい作業のチェック
製造スタッフ部門	半製品、製品	歩どまりの維持、向上および不良対策
品質管理部門	半製品、作業条件	各工程内および各工程間の品質保証

表3 バイポーラ デジタル形集積回路の工程品質管理 工程品質管理を示すフローチャート (表中のPQCはProcess Quality Controlの略)。

Table 3 Flow Chart for Process Quality Control

工 程	管 理 ポ イ ン ト	管 理 の ね ら い
材料受入QC 表面酸化	酸 化 外 観	ピンホール、傷
PQCロット判定 ホトレジスト 100%検査	ホ ト レ ジ ス ト 外 観 寸 法	寸法レベル把握 ホトレジストの良否 チェック
PQC水準チェック 拡散	拡 散 拡散深さ 比 抵 抗 酸化膜厚	拡散状態把握 抵抗値、耐圧、 h_{FE} 、入出力レベル 膜厚コントロール
PQC水準チェック 蒸 着 100%検査	蒸 着 蒸着膜厚 ウェーハ厚	基準膜厚確保 割れ防止、 スクライブ品質確保
PQCロット判定 ウェーハ、ペレットスクライブ 100%検査	ウ ェ ー ハ ウェーハ検査 パトロール	蒸着配線工程チェック テスターのプログラム 管理
PQCロット判定 組 立 100%検査	ペ レ ッ ト ペレット外観	
PQCロット判定 組 立 100%検査	組 立 ペレット付後外観 ボンディング後外観 ボンディング引張 強度	ペレット付品質チェック ボンディング品質チェック 断線防止
PQCロット判定 封 止 100%検査	封 止 封止後外観 外形寸法	外観・寸法保証
個別規格により実施する。 気密性テスト 温度サイクル バーンイン 最終電氣的テスト	マ ー ク マーク強度 不良品解析	解析により対策へ フィードバック
不良解析 外観テスト 製品検査 出 荷		

表 4 信頼性試験と評価可能な故障モード 故障要因に対して有効な信頼性試験方法を示す。

Table 4 Reliability Tests in Conjunction with Failure Modes

故障要因	拡散接合	酸化膜	メタライゼーション	ダイボンディング	ワイヤボンディング	封止雰囲気	封止気密	リード強度	ソルダビリティ	マーク
温度サイクル		○	○	○	○		○			
熱衝撃				○	○		○			
温湿度サイクル					○		○			
振動疲労					○					
可変周波振動					○					
遠心加速					○					
衝撃落下				○	○					
気密性							○			
端子強度								○		
耐溶剤性										○
ソルダビリティ									○	
塩水噴霧								○		
連続動作	○	○	○	○	○	○				
断続動作		○	○	○	○	○				
高温逆バイアス		○				○				
高温放置		○			○	○			○	
高温高湿放置							○	○	○	
高湿バイアス							○			

することが必要となってくる。

フィールド情報が不足する場合には、市場故障率を推定するためにも実装寿命試験を行なうことがあるが、時間と費用を要しタイミングを失すおそれがある。

(3) 試験の精度

信頼性予測の誤りを少しでも小さくするために、試験精度に関する十分な検討が必要であり、試験装置、計測の両面から配慮を行なっている。

国際的な信頼性データの交換、電子部品の品質認証制度などの要求に適応し得る機能を維持するように努めている。

(4) スクリーニング

信頼性試験法と密接な関連を有するので、目的を異にする面もあるがここにとり上げた。問題点は二つあって、まず製品のどの段階で実施するのが効果的であるかということと、副作用について十分検討すべきことの2点である。

集積回路の製造工程内を対象とした場合、メタライゼーション、ボンディングの潜在的欠陥、あるいは汚染、異物混在などのように、半製品の段階でスクリーニングすることが有効なものは工程品質管理の一環として実施している。また実装時のストレスに起因するモードに対しては、セットメーカーの工程におけるデバッグに期待するところが大きい。

4 信頼性管理上の諸問題

集積回路のシステム信頼性に与える影響の拡大に伴い、開発、設計の段階におけるユーザーとの関係の緊密化が必要なことは前述したとおりであるが、故障の未然防止のために行なわれるべき早期の協調体制はいつそう改善されねばならない。



図 4 高温動作寿命試験装置 集積回路の高温動作寿命試験装置の例。バイポーラ デジタル形 IC の場合は、通常直流印加試験が行なわれている。

Fig. 4 Apparatus for High Temperature Operating Life Test

半導体メーカーにおいて留意、検討している事項を以下に述べる。

- (1) システムまたはサブシステムの構想設計の段階でユーザーと緊密な連携をとり、システム信頼度目標の概要、集積回路の信頼度配分に関する的確な認識を把握する。
- (2) 集積回路の構造、材料、プロセスに主眼をおいた信頼性検討を重視し、特に新プロセス技術が適用される場合には製品化に先だって信頼性評価を徹底する。
- (3) 集積回路の実装条件、使用条件の信頼性に与える影響を吟味し、必要に応じてユーザーと共同で検討を実施する。

一方、システム信頼性を向上させるために集積回路のユーザーに期待する信頼性活動は次の諸点である。

- (1) 目的、用途に応じて集積回路の信頼性要求を区分し、信頼性トレードオフに基づく信頼度配分を明らかにする。
- (2) 故障モードとその影響度の解析(FMEAまたはFMECA)により、クリティカルな部品、故障モードをメーカー側に周知徹底させる。
- (3) システムデバッグ、フィールドなどにおける故障情報をフィードバックし活用する。

いずれにせよ集積回路の開発、生産が、システム設計と並行して進められる実情からみて、システム設計の段階において集積回路に要求される基本故障率、使用信頼性に関する有用な情報がタイミングよく交換されることが何よりも必要と考えられる。

また信頼度データ、フィールド情報については、ユーザーとメーカー、あるいはユーザー間において試験が重複して行なわれるケースもみられ、データ交換の場を通じて情報が整理され、より有効なデータ追求に主力が注がれることが望まれる。

5 結 言

集積回路の開発、生産における信頼性管理の現状と問題点について概要を述べた。高信頼性を達成するための考え方、技術ならびに管理上のポイントについてユーザーの理解を得るとともに、さらに管理システムを改善するための協力、助言をいただければ幸いである。