

知識ベースに基づく半導体プロセス診断方式†

栗原 謙 三^{††} 明石 吉 三^{††} 天満 正^{††}

半導体製品の超微細化に伴って、設計マージンを小さくせざるを得なくなっており、従来は問題とならない僅かな製造プロセス異常が製品不良を発生させてしまう。このように、半導体の設計・製造・検査の技術は困難さが増大しており、新製品の開発・量産立上げ期間が長期化する傾向にある。これを解決するには、異常原因を高確度かつ迅速に同定する必要がある。半導体製品の開発・製造には、ノウハウ技術が多数存在するため、その異常診断には対象の物理に関する理論的知識だけでなく、技術者の経験的専門知識が活用される。本論文では、知識工学アプローチにより上記の両知識を融合し、これによって異常工程を迅速に同定する半導体プロセス診断方式、および、これを実現する知識ベース・システムを提案する。

1. ま え が き

半導体製品の集積度は増加の一途をたどり、IC から LSI, VLSI へと進展してきた。この高集積度化に伴って、設計マージンを小さくせざるを得なくなっており、従来は問題とならない僅かなプロセス異常が製品不良を発生される傾向が強くなっている¹⁾。このように、半導体の設計・製造・検査の技術は困難さが増大しており、不良原因を高確度・迅速に同定することの必要性がますます強くなってきている。

半導体製品の開発、製造には、ノウハウ技術が多数存在する。そのため、その異常診断には、対象の物理に関する理論的知識だけでなく、熟練技術者の経験的専門知識が不可欠である。これらの経験的知識は技術者個人の私有財産となりがちであり、しかも、プロセスの複雑化によって知識は多数の人に分散してしまう傾向にある。このような背景から、複数技術者の知識の共有、伝承、高度化により迅速な診断の実現をねらいとした、診断システムの開発が望まれている。

専門家の知識を活用した診断システムとしては、スタンフォード大の MYCIN²⁾、東大の MECS-AI³⁾ など多数のシステム^{4),5)} が公表されている。これらのシステムが基盤とするプロダクション・システム^{6),7)} における知識表現方式は命題論理式あるいは述語論理式に類するものであり、異常現象とその原因との間の、いわゆる因果関係知識の表現に適している。しかし、半導体プロセスのような工学システムの診断においては、実験式や理論式などの数式モデル、シミュレーション

・モデルなども重要な診断知識である。

本論文では、工学システムにおける上記の特徴に着目し、経験的に得られる因果関係知識だけでなく、数式モデルなどの知識をも有機的に組合せ活用することを特徴とする半導体プロセス診断方式を提案する。さらに、これを実現する知識ベース・システムを提案する。本論文の主眼は知識ベースも含めたプロセス診断システムそのものの提案にあるのではなく、診断のための知識ベース・システムの構成を提案することにある。したがって、本文に示す知識ベースの内容に関する記述は一例を示すものであり、他の診断システムに対しては相当する知識を知識ベースに格納すればよい。

2. 半導体プロセス診断問題

集積回路の電気特性は、製造プロセスの変動によって変化してしまう。設計者は、この変動を考慮して、余裕をもったプロセス設計を行う。しかし、最近の超微細化に伴ってプロセス余裕が小さくなり、特性ばらつきによって製品歩留りが決まることが多い¹⁾。したがって、歩留りを向上し、その高歩留りを維持するためには、プロセス起因による歩留り低下の原因を早期に究明し、対策することが重要である。

製造プロセス内の各工程直後に検査を実施して、工程作業の良否を判定することが理想である。しかし、これを実現することは、次の理由により、現実には困難である。

(1) 大量生産である。

LSI は大量生産される。また、その製造プロセスは多数の工程からなる。そのため、検査対象とする LSI チップおよび工程を少数に限定せざるを得ず、この検査はプロセスの安定性を監視することに重点

† Knowledge-Based Process Diagnosis Method for Semiconductor Manufacturing by KENZO KURIHARA, KICHIZO AKASHI and TADASHI TENMA (Systems Development Laboratory, Hitachi Ltd.).

†† (株)日立製作所システム開発研究所

がおかれている。

(2) 検査作業は歩留り低下の一因である。

これからのサブミクロン・プロセスでは、検査に電子顕微鏡などの大きな装置が不可欠であり、検査時間も長くなる傾向にある。検査によって生産リードタイムが長くなれば、異物付着や汚染の確率が高まり、歩留りは低下する。検査の簡略化が強く望まれている。

(3) 各工程直後の検査結果は完成品のそれと異なる。

半導体製品は基本的には多層の積み重ね構造をしており、各層は熱処理とエッチングの繰り返しで順に形成される。新しい層を形成する際、下層部は熱による変化を受けたり、削られたりする。したがって、各工程直後の検査は完成品の構造を調べていることにはならず、完成品の本当の構造を知るには、完成品そのものを調べなければならない。

このような状況の下で、プロセス起因の異常原因を迅速に究明することが、半導体プロセス診断の課題である。

3. 診断方式の提案

3.1 基本構想

各工程終了ごとにその作業結果を直接検査できなくても、完成品の構造上の異常箇所を知ることができれば、その異常原因はその膜の形成に関与する少数の工程に限定することができる。したがって、異常原因を究明するための一つの方法は、完成品の各層を一枚ずつ削り取って検査することである。ところが、この分解検査には高度の熟練技術と膨大な時間を必要とする。そこで、この分解検査をソフトウェア技術で模擬的に実施してしまい、さらに、その実施結果を知識工学技術で解析することを特徴とする、次の構想を立案した。

診断用テスト・パターンを製品ペレットと同時にウェハ上に作成し、その電氣的測定データから、直接測定が困難な素子構成要素パラメータを推定する。さらに、その推定値の正・異常の組合せから、その原因工程を究明する。この診断では、プロセスに関する物理現象の理論的な理解と経験的な専門知識が不可欠である。多数の技術者に分散している専門知識をプロセス診断に有効活用することは、製品の多集積化に伴ってますます重要となり、その実現のためには知識工学を応用した知識ベース・システムの開発が有効であろう。

ところで、半導体プロセスのような工学システムでは、定性的な異常現象だけでなく、定量的な測定データを得やすく、また、数式表現される知識も多数存在する、という特徴がある。そこで、これら数式モデルと現象・原因間因果関係知識を組合せ活用して、上記の構想に基づく診断を進める知識ベース・システムを開発する。

3.2 診断方式

基本構想に基づいて、図1に示す3ステップからなる診断手順で半導体プロセス診断を実施する。以下、各ステップの概要を示す。

(1) ステップ1：素子構成要素パラメータ値の推定

素子構成要素パラメータ値を直接的な方法で測定することは困難である。測定容易な電氣的測定データから上記パラメータ値を推定できれば、問題は解決する。しかし、最先端製品について、VLSI製品の電気特性値と素子構成要素パラメータ値とに関する、多変数の高度な数式モデルを開発することは容易でない。

そこで、素子構成要素パラメータ推定用の特別のテスト・パターンを製品ペレットと同時にウェハ上に作

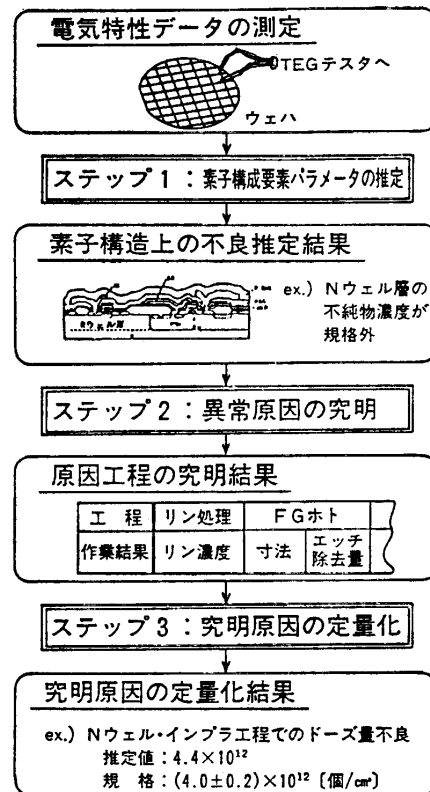


図1 診断手順

Fig. 1 Diagnosis procedure.

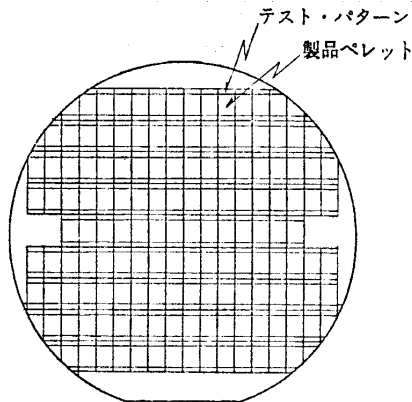


図 2 半導体ウェハ
Fig. 2 Wafer.

成し (図 2 参照), その電気測定データを利用する。この測定データと素子構成要素パラメータとの関係を示す数式モデルは, 対象とする変数が少ないため, 実験式あるいは理論式として得られる。

(2) ステップ 2: 異常原因の究明

素子構成要素パラメータ値は多種類のプロセス・パラメータの値によって決まる。さらに, 装置ごとの癖も影響することがある。そのため, これらのパラメータ間の数式モデルの開発は容易でない。そこで, 理論的・経験的に得られる, 現象・原因間の定性的な因果関係知識をプロダクション・ルールで表現し, これらルールを用いたプロダクション・システムによって素子構成要素パラメータ異常の原因を究明する。

半導体プロセスは大規模プロセスであり, 異常発生の原因は多岐にわたる。異常波及の構造を把握しないままにプロダクション・システムを適用したのでは, 探索するルール数が膨大となってしまう。また, その膨大なルールを初めからすべて収集することは難しい。本研究では, 究明する原因レベルを階層化し, これに応じて診断知識を分割した。階層化レベルは, (i) 工程作業結果異常の究明, (ii) 装置制御パラメータ異常の究明, の 2 レベルである。この階層化により, システムの段階的開発を可能とし, 特に(ii)のレベルは詳細原因を究明したい工程ごとに順次開発できる。

(3) ステップ 3: 究明原因の定量化

プロダクション・システムによって原因項目は究明できるが, その原因項目の異常さを定量的に推定することは困難である。しかし, 究明した原因が真に起こり得るか, また, 具体的対策をどうすべきか, などを判断するためには, その原因の異常さを定量的に評価することが有効である。

一般に, 各原因に起因する異常現象を表す変数は少数に限定できる。そのため, 個々の原因ごとには, 原因・現象間の数式モデルを, 実験式や理論式として得られる場合が多い。そこで, プロダクション・システムで原因を究明後, その異常の程度を上記数式モデルで定量化する。これによって, 原因の定量的究明が困難というプロダクション・システムの欠点を改善する。

4. 知識ベース・システム開発における技術課題とその解決策

4.1 技術課題

知識ベース・システムの開発における技術課題は, 一般に, 次の 4 課題である。前章に示した診断方式を実現するために解決すべき各課題の特徴を以下に記す。

(1) 知識表現方式

半導体プロセスは物理現象を利用しており, その診断には原因・現象間の定性的な因果関係知識だけでなく, 数式モデル知識を活用する。これら知識の表現方式を開発する必要がある。

従来から, 前者の因果関係知識の表現方式には, if then ルール形式がある。これは単なる含意を示す論理関係を示すため, すべての知識を含意による論理関係に変換して表現する必要がある。そのため, if then ルールによって表現された知識は, その意味を理解しにくい場合がある。知識の収集, 整合性の確保を容易にするために, 知識の意味を理解しやすい表現方式を開発することが課題である。

(2) 推論方式

因果関係知識は異常現象とその原因との間の定性的関係を表し, 数式モデル知識はそれらの定量的関係を表す。これら知識で処理するデータはそれぞれ文字列データと数値データであり, データ型が異なっている。したがって, 知識を適用して得た結果の各データ型を適宜他方の型に変換することにより, 因果関係知識と数式モデル知識を有機的に組合せ活用できる推論方式の開発が必要である。

また, 因果関係知識による推論方式としては, 原因の見落しを回避する方式を開発する必要がある。経験的な因果関係知識は経験の積み重ねによって順次拡張されていくのが普通であり, 知識間の不整合が発生しやすい。不整合があった場合, 原因の見落としが起きる。例えば, 図 3 (a) に示す 3 ルールで表現すべき知識を, (b) に示す途中事象の省略された 3 ルールで表

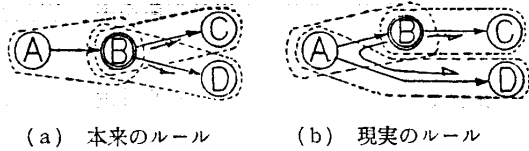


図3 途中事象の省略例
Fig. 3 Example of node omission.

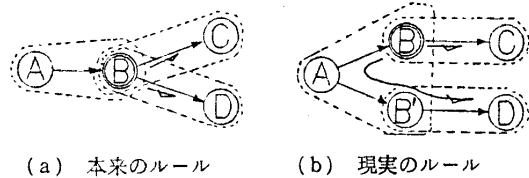


図4 同一事象の別表現例
Fig. 4 Example of node duplication.

現した場合を考える。この場合、事象Bの観測時には事象CとDが導かれるべきであるが、(b)のルールに順方向推論を適用したのでは事象Dを見落す。同様に、途中事象が別表現された、図4(b)の場合にも、事象Dを見落す。このような見落しを回避する推論方式を開発する。

(3) システムと解析者との対話方式

診断の最終的判断は解析者自身が行うものであり、システムのねらいは診断の支援にある。診断支援のために、解析者に与えるべき情報とその表示形態をいかにすべきか、などマン・マシン・インタフェースを開発する必要がある。

(4) 知識獲得方式

エキスパートは、半導体プロセスの物理現象に関す

る理論の修得とプロセス診断経験を通して、知識の質と量を向上させる。エキスパート・システムにおいても知識量を増加し、その整合性・確実性を高めていくことが不可欠である。知識の自動獲得は将来の大きな課題であり、この課題解決の第一歩として知識をエキスパートから抽出・整理するガイド・システムを開発する必要がある。

本論文では、上記課題(1)(2)(3)の解決策を順に次節以降に提案する。なお、課題(4)は今後の課題として残されている。

4.2 診断知識表現方式

提案診断方式では、表1に示す各種の知識を利用する。各知識の内容と表現方式を以下に記す。

4.2.1 素子構成要素パラメータ値の推定知識

(1) 知識の内容

テスト・パターンの電氣的測定データから素子構成要素パラメータ値を推定するための知識である。この知識そのものは理論的知識である。ただし、テスト・パターンの設計には技術者の経験的知識を必要とする。

推定する素子構成要素パラメータは、平面構造パラメータと縦構造パラメータに分類される。前者は、寸法、マスク合せずれなどであり、これらは電気抵抗から推定する。一方、後者は、膜厚、不純物濃度などであり、電気容量から推定する。推定するパラメータの具体例を表2に示す。

推定の具体例としてゲート長推定を取り上げ、テスト・パターンと推定式の一例を以下に示す。ゲート長の推定には、表3に示す2種類のゲート抵抗を用意す

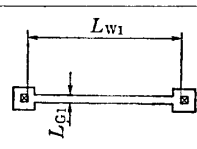
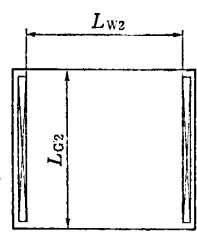
表1 各ステップで活用する診断知識とその表現方式
Table 1 Diagnosis knowledge for each step and its representation method.

知識利用目的	表 現 方 式	
(1) 素子構成要素パラメータの推定 (ステップ1に対応)	数式モデル	<表現例> $L \cdot G = R \cdot FG$ 200/R. FG 2*200 $15 = <R \cdot FG$ 200 = <40 $1500 = <R \cdot FG$ 2 = <4500 $10 = <BV \cdot G$
(2) 不良原因の究明 (ステップ2に対応)	異常現象・原因間因果関係 (IF~THEN~, SAME~INC~, EXC~)	<表現例> IF (T. FOX : VV) (F. ヨコスン: V) THEN (GATE. OX::ジョキョリョウ: A)
(3) 究明原因の定量化 (ステップ3に対応)	数値演算プログラム (シミュレータ等)	<表現例> 原因別に独立した'プログラム'で記述

表 2 主要な素子構成要素パラメータ (MOS FET)
Table 2 Main device parameters for MOS FET.

大分類	中分類	小分類 (パラメータ名)
平面構造 パラメータ	寸 法	① ゲート長 ② チャネル長 ③ チャネル幅 ⋮
	マスク合せずれ	① L-FG ⋮
縦構造 パラメータ	膜 厚	① ゲート酸化膜 ② フィールド酸化膜 ③ 層間膜 ⋮
	濃 度	① ウェル濃度 ⋮

表 3 診断用テスト・パターン例
Table 3 Example of test pattern for diagnosis.

No.	診断用 テスト・パターン	測定 データ	推 定 式
1		R_{FG1}	$L_{G1} = \frac{R_{FG2}}{(L_{W2}/L_{G2})} \times \frac{L_{W1}}{R_{FG1}}$
2		R_{FG2}	前提条件 $c_1 \leq R_{FG1} \leq c_2$ $c_3 \leq R_{FG2} \leq c_4$ $c_5 \leq BV_G$ 注) c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 は定数

る。パターン # 1 は製品本体のゲート長と同じ設計幅を持つ細長いパターンであり、パターン # 2 は幅も広いほぼ正方形のパターンである。このパターン # 1 の幅を推定し、これを製品本体のゲート長推定値と考える。ウェハ上に同時に作られる両パターンのシート抵抗は等しいことから、次の推定式が導かれる。

$$L_{G1} = \frac{R_{FG2}}{(L_{W2}/L_{G2})} \times \frac{L_{W1}}{R_{FG1}} \quad (1)$$

ここで、 R_{FG} は抵抗値、 L_w は長さ寸法、 L_g は幅寸法 (すなわち、ゲート長) を表し、添数字がパターン # を示す。 L_{w1} 、 L_{w2} 、 L_{g2} はプロセスの寸法加工ばらつきに比べて十分大きいオーダーとしてあり、それらの設計寸法を代入しても推定誤差は無視できる。したがって、式(1)に上記の設計寸法と抵抗測定値を代入してゲート長を推定する。なお、この推定に当たっては、

パターンが正常に作られていなければならない。したがって、パターンが正常にできていることを保証する前提条件をチェックしてから、上記の推定計算をする必要がある。本推定例の場合、抵抗の測定値 R_{FG1} 、 R_{FG2} がそれぞれ設計仕様から決まる範囲内にあり、さらに、ゲート耐圧 BV_G が同じく設計仕様から決まるある値以上であれば、パターンが正常にできていると考えられる。このように、前提条件は理論的、経験的な知識として得られる。

(2) 知識の表現方式

設計変更、プロセス変更、あるいは、解析経験の積み重ねによって、知識は改良されていく。したがって、拡張性のある表現・格納方式が望まれる。そこで、プロダクション・ルールのように、数式モデル単位で独立に修正、追加、削除できるようにした。ここで、個々の数式モデルは、前述の表 3 に示すように前提条件付きの数式モデルとして表現する。これら数式モデルは後述の推論機構によって解釈・実行される。

4.2.2 異常原因の究明知識

(1) 知識の内容

半導体プロセスは大規模・複雑なプロセスであり、異常現象とその原因との間の因果関係知識は多数の技術者にわたる膨大な量となる。そこで、知識の階層化により、知識獲得の容易化、知識の段階的な拡充、知識活用時の CPU 時間の短縮などの実現をねらう。本研究では、前述のように究明原因の詳細度を基準として、知識を 2 階層に分割した。すなわち、階層 1 は作業結果異常の究明知識、階層 2 は装置制御パラメータ異常の究明知識とした。

半導体プロセスは、多数の作業から構成されるため、技術者は各作業ごとに専門化が進んでいる。そのため、プロセス内のどの作業で異常が発生しているかを究明することが難しくなっており、原因作業が究明されれば、その作業の専門家が詳細解析を行える。そこで、本論文では、階層 1 の範囲に絞って以下の議論を進める。

作業結果異常の究明知識は、'作業結果の異常がどのように波及して素子構成要素パラメータを異常とするか'に関する知識である。これは、物理現象とプロセス設計仕様の理解により理論的に得られるだけでなく、経験を通して得られることも多い。これら知識の概念的構造を表 4 に示す。表の縦軸は各工程での作業結果を、横軸は素子構成要素パラメータを表す。各行は、各作業結果異常が波及する素子構成要素パラメータを

表 4 異常原因究明知識の概念的構造
Table 4 Conceptual structure of cause inference knowledge.

素子構成要素 パラメータ		設計規格との比較		寸 法										膜 厚						濃 度	
				ゲート長		チャネル長		チャネル幅		拡散層幅		ゲート酸化膜		フィールド酸化膜		層間膜		ウエル濃度			
作業名	作業結果	N	P	N	P	N	P	N'	P'	N	P	N	P	N	P	PW	NW				
インプラ(1)	ドーズ量	↑														↑					
拡散(1)	拡散量	↑														↑	↓				
ホトレジ(1)	寸 法	↑				↑	↑	↑	↑												
インプラ(2)	ドーズ量	↑				↑															
拡散(2)	拡散量	↑				↑	↓	↓	↓			↑	↑								
除去(1)	除去量	↑										↑	↑								

表し、矢印の向きは設計基準値からのずれ方向を示す。

(2) 知識の表現方式

知識の概念構造は表4のように示すことができるが、実際の異常波及過程は複雑である。すなわち、作業結果異常は複数段の因果関係を経て素子構成要素パラメータ異常に達し、それら個々の因果関係はネットワーク状に関連している。しかも、知識は実験や経験を通して得られるものが多く、最初から完全な知識を集めることはできない。したがって、知識のメンテナンスを容易にして、確度の高い知識にしていく必要がある。

従来からのプロダクション・ルール表現方式は、知識の保守性に優れており、本研究でも基本的にはこの方式を適用する。このプロダクション・ルールは if then 形式で知識を記述するものであり、すべての知識を含意という論理関係だけで表現しなければならない。半導体プロセスの診断知識は含意関係で表現可能であるが、すべての知識を含意関係に変換して表現したのでは、知識そのものの意味をとりにくい場合がある。そこで、知識を次の4種類に分類し、それぞれに対して知識の論理的意味を表現可能な方式を導入した。なお、下記の表現方式の中に示す英小文字は異常現象、または、原因項目を表している。

(a) 因果関係知識: IF(x_1, x_2, x_3, \dots) THEN(y_1, y_2, y_3, \dots)

ある事象が是のとき、別の事象が是となる関係。診断知識の大多数は異常現象とその原因との因果関係知識である。これは通常の if then ルールで表現

する。

(b) 排反関係知識: EXCLUSIVE(u_1, u_2, u_3, \dots)

複数の事象が同時には是とならない関係。例えば、異常現象を相互に独立な複数個のカテゴリに分類した場合の、カテゴリ間の関係がその典型である。

(c) 包含関係知識: INCLUSIVE($v_1, (v_2, v_3, \dots)$)

ある事象が別の事象に包含される関係。この知識の典型は、事象を複数事象に細分したときの、細分前後の事象間の関係である。

(d) 同値関係知識: SAME(w_1, w_2, w_3, \dots)

表現は異なるが意味は同じ事象群の関係。複数人に分散する知識を結びつけるときに利用する。

4.2.3 異常原因の定量化知識

(1) 知識の内容

プロダクション・システムにより異常原因が究明されたとき、原因である事象の異常内容を定量化するための知識である。理論式・実験式として得られる数式モデル、シミュレータなど、種々の形式の知識が存在する。例えば、イオン打込工程で打込量の異常があると推定された場合には、不純物濃度 N とドーズ量 (打込量) D とに関する実験式 $N=c_1D+c_2$ (c_1, c_2 は定数) を用いて、作業の操作量 D を推定できる。

(2) 知識の表現方式

知識の多様性に対処するために、この知識は高級言語 (FORTRAN 等) で記述したプログラムとして表現する。

4.3 推論方式

第3章で述べたように、次の3ステップで半導体プロセスを診断する。各ステップでの推論方法を以下に詳述する。

4.3.1 素子構成要素パラメータ値の推定と異常の判定

テスト・パターン測定データを前節に示した数式モデルに代入して、直接測定が困難な素子構成要素パラメータ値を推定する。ここで、ゲート配線幅と拡散層配線幅を推定した後、さらに、これら推定値を用いて拡散層深さを推定する、という多段に推定する場合もある。そこで、前提条件付きの数式モデルを知識ベー

ストみて、プロダクション・システムの考え方を導入した。すなわち、数式モデルの前提条件が if 側に、数式が then 側に相当すると見て、前提条件を満足する数式モデルを次々と探し、推定計算を進める。

各推定値はそれぞれの設計規格と比較し、異常の有無を判定する。これら推定値および測定値そのものの異常判定結果は、パラメータ名とその異常内容からなるリスト形式で原因究明ステップに渡される。

4.3.2 異常原因の究明

この診断では、LSI の電気的な測定値およびそれに基づく推定値の異常発生状況から、その異常原因である工程を推定する。本論文で提案する方式では、まず、異常現象から想定される仮説をすべて抽出し、その後、それらの仮説を一つずつ検定する。以下、本方式の考え方とアルゴリズム概要を示す。

(1) 仮説設定方式

仮説設定は、基本的には、Forward 推論で実現する。すなわち、観測事象を if 側にもつルールを探索し、そのルールの if 側事象の中に否定されているものがない限り、そのルールの then 側事象は成立する可能性があると考え、このようにして見出した事象について、上記と同じ操作を繰り返すことによって、成立する可能性のあるすべての事象を抽出する。抽出された事象のうち、then 側にだけ現れる事象が根本的原因である可能性をもっており、これが仮説である。

ところで、異常診断に関する知識は経験的に得られるものが多く、また、多数の技術者に分散している。そのため、それら知識間に整合性がとれていないこともあり、図 3、図 4 で説明したように原因仮説の見落しが起きやすい。この見落しを回避するために、Backward 推論と Forward 推論の組合せによって仮説を設定する。すなわち、まず、素子構成要素パラメータ異常から引き起こされ得る事象を探索する。本論文では、if then ルールの if 側に異常現象、then 側にその原因を記しているの、この探索は Backward 推論に相当する。次に、探索した事象の原因となり得る事象を仮説とするために上述の Forward 推論を実施する。

なお、知識には排反、包含、同値関係ルールで表現されたものもある。これらのルールは、if then ルールを Forward または Backward 推論に適用して新たに成立することが判明した事象（‘新事象’と呼ぶ）を見出す度に、次のように活用する。

(i) 排反関係ルール ‘新事象’ が記述されているルールを探索し、そのルールに記述されている他の事象はすべて成立しないとする。

(ii) 包含関係ルール ‘新事象’ が被包含事象側に記述されているルールを探索し、そのルールで包含事象側に記述されている事象はすべて成立するとする。

(iii) 同値関係ルール ‘新事象’ が記述されているルールを探索し、そのルールに記述されている他の事象はすべて成立するとする。

ここで、(ii)、(iii)で見出した事象も ‘新事象’ として、(i)(ii)(iii)を繰り返し適用する。‘新事象’ が見出せなくなったら、if then ルールによる Forward または Backward の推論に戻る。

(2) 仮説検定方式

仮説検定は Backward 推論で実現する。すなわち、設定した仮説を then 側に持つ if then ルールを探索し、そのルールの if 側事象がすべて成立していれば、仮説は成立する。否定された事象が一つでもあれば、仮説は成立しない。ここで、if 側事象の中に成否不明の事象があれば、その事象の成否を調べるために、上記と同じルール探索と適用を繰り返す。その結果、適用できるルールがなくなっても成否不明の事象があれば、解析者にその事象の成否を質問する。この質疑応答により、新事実が明らかになったときは、Backward 推論を中断し、新事実に基づいた Forward 推論を実施する。この Forward 推論は具体的には次のように実行する。

新事実が確認できた際、その事実と既知事実とだけで if 側が構成される if then ルールを探索し、そのルールの then 側事象を新たな事実と考える。この事実に対して、さらに上記と同様にルール探索と適用を繰り返す。これによって、各時点までの情報から導かれることはすべて事前に導いておくことができ、既知情報からわかることを質問しない。

なお、排反・包含・同値関係ルールに対しては、新事実を得る度に、仮説設定の時と同様に活用する。また、ルール間にコンフリクト発生時は、前提条件中の成否不明事象が最も少ないルールを優先的に適用する。

上記の推論方式の問題点は、知識ベース中のルール数の増大に伴って、計算時間が指数的に増大することである。そこで、知識ベースを次のように分割して、推論の高速化を図る。

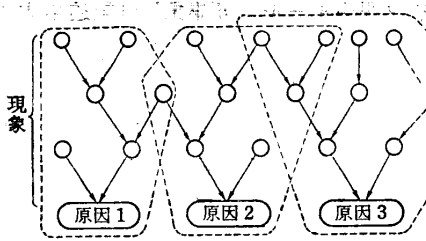


図5 知識ベース分割の概念

Fig. 5 Concept of knowledge-base reduction.

各異常現象を引き起こす原因は、通常、少数に限定されるため、各ルールは原因ごとに分類することが容易である。この概念を図5に示す。異常診断知識が持つこの特徴を利用して、上記の推論方式を次のように改良する。まず、異常原因ごとに、Backward 推論時に到達し得るルールを事前にすべて抽出し、そのルール番号リストを作成しておく。一方、各原因の検定時にはその原因についての上記ルール番号リストを参照して、そのリストに記載されているルールだけからなる知識ベースのサブセットを作り、この小さな知識ベースを用いて検定する。

4.3.3 異常原因の定量化

上記の原因究明では、MYCIN 等における確信度係数を採用しない。その理由は、(i) 確信度 CF (Certainty Factor) の設定基準が決め難く、ルールや観測事実に CF を与えることは實際上困難、(ii) 本システムのねらいは詳細解析すべき事項の提示にあり、疑わしい原因候補をすべて抽出することが目的、の2点にある。

提案システムは複数の原因候補を提示するため、各原因候補の疑わしさの尺度として CF にかわるものが必要である。これは、各原因候補の異常内容を定量的に示すことによって実現する。この定量化のための知識は前述のようにプログラム・サブルーチンで記述されており、プロダクション・システムで原因を究明後、ルールから上記ルーチン呼び出して異常原因を定量化する。

4.4 マン・マシン・インタフェース

診断支援システムは自動診断ツールでなく、技術者による診断を支援するツールである。したがって、診断を実施する機能だけでなく、診断過程の説明機能を中心とするマン・マシン・インタフェースの充実が重要である。診断過程説明機能としては、次の3機能を設定した。なお、各機能の主要な出力の具体例は、5.2節に示す。

(1) 診断結果表示機能

表示する項目は次の2種類である。

- (i) 素子構成要素パラメータ値の推定結果、およびその異常判定結果
- (ii) その原因である異常な作業結果、およびその値

(2) 推論過程説明機能

解析者が最終的に判断するには、診断結果に至るまでの過程を解析者自身が理解する必要がある。

上記(1)の(i)に対しては、素子構成要素パラメータ値の推定に利用した、数式モデル、入力データ値、前提条件式の成否などを解析者からの要求に応じて表示する。また、(ii)に対しては、原因事象と素子構成要素パラメータ値異常の推定結果との間の因果関係をトリー状に表示する。このとき、使用したルールも具体的に示す。

(3) 質問理由説明機能

異常現象の発生の有無に関する質問は、知識(ルール)に書かれている事象の成立の是非を確認するために行われる。しかし、解析者は必ずしもその知識を知らないため、その質問をシステムから問われた理由がわからないこともある。この場合は、解析者からの要求に応じて、適用を試みつつあるルール、およびそのルールと検定仮説との関係を説明する。また、システムからの質問に対して即答できず、新たに検査や実験を必要とする場合も多い。このとき、解析者が 'UNKNOWN' と答えれば、システムは診断を停止し、診断に必要な質問事項をすべてまとめて表示する。これによって、解析者は新たに検査または実験すべき項目を知ることができる。

5. プロセス診断システムの試作と機能実験

5.1 ソフトウェア構成

試作した半導体プロセス診断システムは、Mシリーズ計算機とカラー・グラフィック端末を利用した対話型システムである。本システムのソフトウェア構成の概略を図6に示す。図中のハッチング部分は数値データおよびそれを処理するソフトウェアであり、他は文字列で表される定性的データに関するものである。このように、数値データと文字列データを共に活用しながら診断を進めるために、ソフトウェア構成上、次の工夫をしている。

- (1) 数値処理に FORTRAN、文字列処理に LISP 扱うデータの型に応じて言語を使いわけること

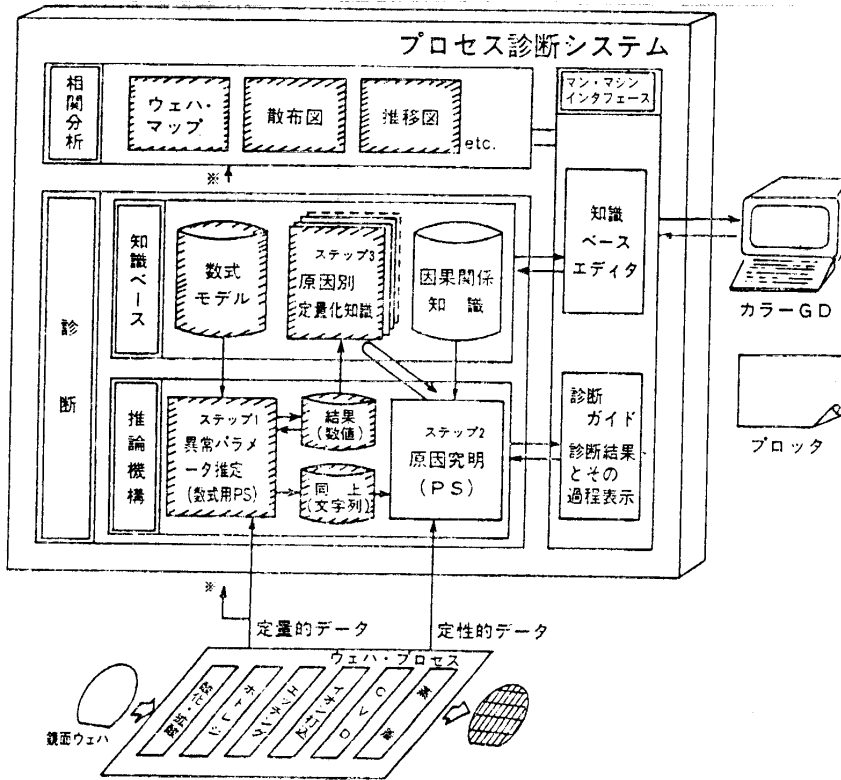


図 6 ソフトウェア構成
Fig. 6 Software structure of process diagnosis system.

数値データは設計規格との比較により異常の有無を示す文字列データに変換し、これを LISP に渡す。逆に、異常と推定された変数名などの文字列データは LISP から FORTRAN に渡され、値の推定を始めとする数値演算を実行する。

(3) ルールから FORTRAN プログラムを呼出し

原因究明後、その原因の異常程度を定量化するために問題別専用プログラムを実行する。このとき、プロダクション・ルールからそのプログラムを呼び出す。

5.2 診断実施例

模擬データを用いた診断例によって、診断手順およびシステム出力形式を説明する。

手順 1 : 素子構成要素パラメータ値の推定

解析対象チップのテスト・パターン測定データと数式モデルを用いて、測定困難な素子構成要素パラメータ値を推定する。推定結果の表示例を図 7 に示す。図において、上半分は異常箇所を断面模式図上で表示したものである。また、下半分は推定結果の一覧表であり、この例では、酸化膜厚、Pウェル濃度等に異常があると推定された

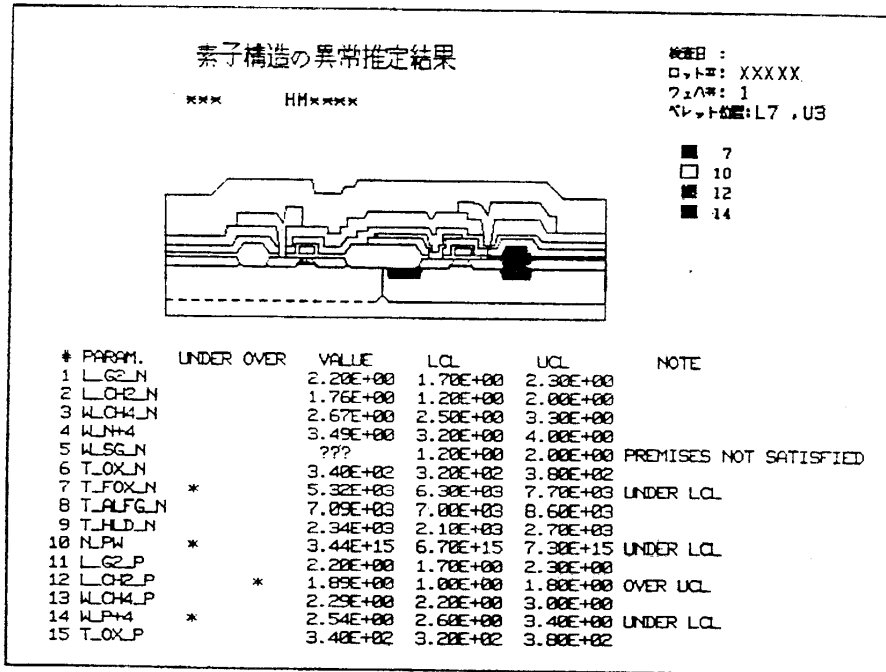


図 7 素子構成要素パラメータ値の推定
Fig. 7 Estimation of device parameters.

より、ソフトウェア開発を容易にするとともに、計算実行を高速化する。

(2) FORTRAN, LISP 間でデータ授受

ことを示す。

手順 2 : 異常原因の究明とその定量化

テスト・パターン測定データ、および素子構成要

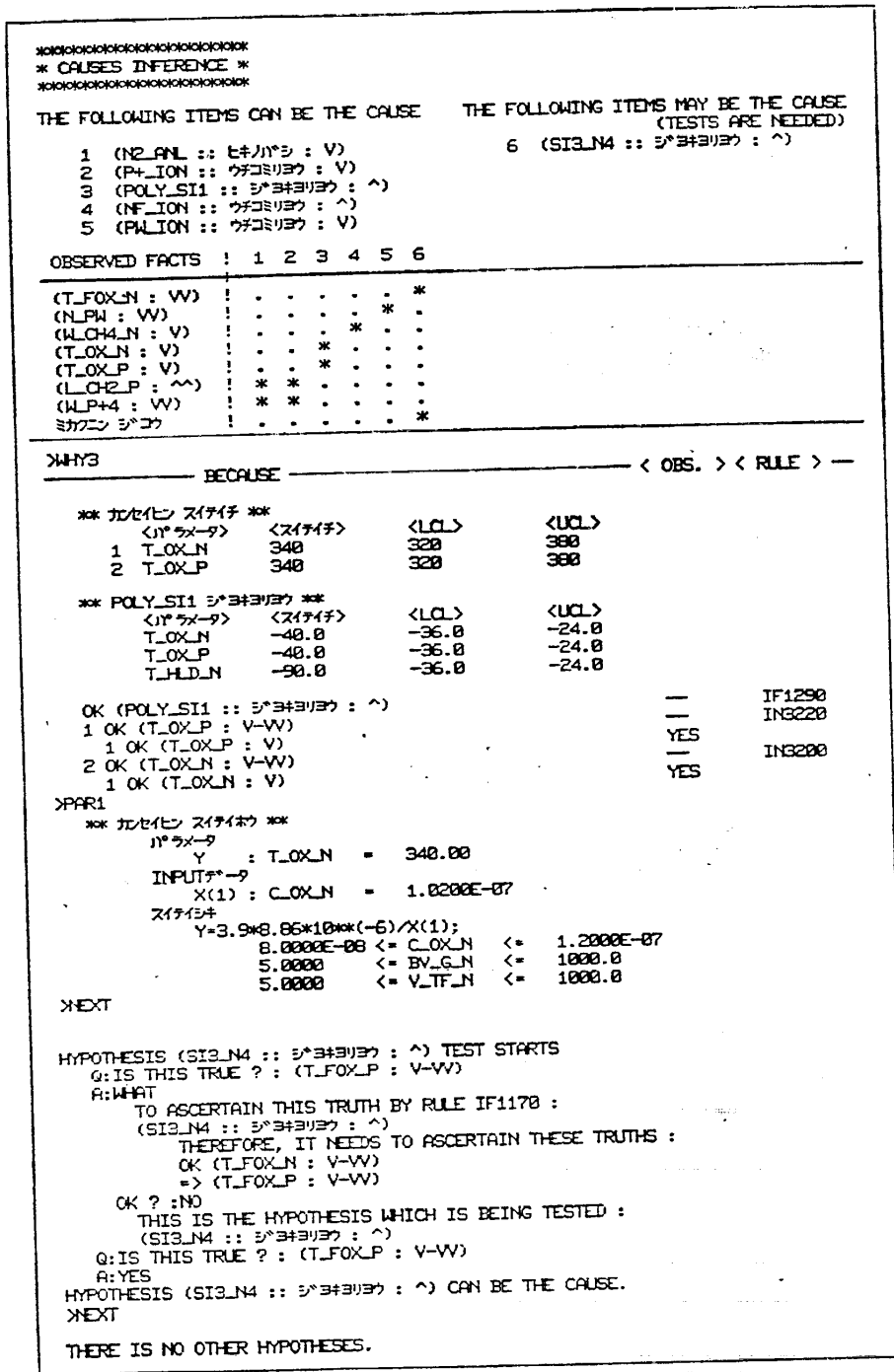


図 8 異常原因の究明とその定量化
Fig. 8 Causes inference and their quantitative evaluation.

素パラメータ値の異常推定結果に基づいて、プロダクション・システムによる原因究明を行う。一例を図8に示す。本例の場合、可能性が高い原因として5件、可能性はあるが既知情報だけでは断定できない原因(仮説)として1件、推定されている。可能性が高いとされた前者の事象については、結

論に至るまでの推論過程を説明させることができる。同時に、異常原因を定量的に表示させることができる。図8では、'WHY 3' と入力することにより、原因#3の推論過程を説明させた例を示す。また、'PAR 1' と入力すれば、推定パラメータ#1の推定法を示させることができる。

一方、後者の仮説はシステムと解析者との対話形式で検定する。システムはその仮説が正しいとき観測されるべき現象を抽出し、その是非を調べることにより検定を行う。既知情報からでは是非不明のことは解析者に質問するので、解析者は'YES' または 'NO' を答として入力する。ここで、'WHAT', 'UNKNOWN' を入力することもできる。'WHAT' を入力すれば、図8に示すようにその質問をした理由として適用を試みているルールが表示される。そのルールと仮説との関係を理解できない場合、システムの'OK?' 出力に'NO' と答えれば、もう一段仮説に溯ったルールを表示させることができる。また、'UNKNOWN'

と入力した場合は、検定に必要なすべての現象が一括して出力される。

6. あとがき

半導体プロセスは工学システムであり、プロセスの物理現象に関する数式モデル、シミュレーション・モ

デルなどの知識が多数存在する。しかし、これらモデルはプロセスの一部を切り出したものであるため、それだけでプロセス診断はできない。そこで、これらモデルを現象・原因間因果関係知識で結合して活用することを特徴とする診断方式、および提案方式を実現する知識ベース・システムを提案した。さらに、システムを試作し、提案システムの有効性を確認した。

本システムでは、プロダクション・システムの考え方を適用して、数式モデルや因果関係などの知識を知識ベースとして独立させ、知識の保守を容易とした。これによって、診断精度の向上、複数製品への拡張などを可能とした。なお、今回のシステムは PL/I と UTILISP 言語を用いて、HITAC M-200H 上に構築した。

謝辞 UTILISP を利用させていただいた東京大学和田研究室の方々に深謝いたします。また、半導体プロセスの診断技術についてご指導、ご討論をいただいた(株)日立製作所 武蔵工場小佐保信部長、目黒怜主任技師、長沢幸一技師に深い謝意を表します。最後に、本研究の機会とご指導をいただいた当所システム開発研究所川崎淳所長、井原廣一副所長、春名公一部長に感謝いたします。また、システム試作については日立マイクロコンピュータ・エンジニアリング(株)神崎統雄氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 谷口研二: LSI プロセス・シミュレーションの現状と動向, 電子通信学会誌, Vol. 65, No. 12, pp. 1303-1309 (1982).
- 2) Shortliffe, D. S.: Computer-Based Medical Consultation: MYCIN, p. 250, American Elsevier, New York (1976).
- 3) 小山照夫, 開原成允: 時間経過の概念を含む汎用医療コンサルテーション・システム, 情報処理学会論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 414-420 (1982).
- 4) Gevarter, W. B.: Expert Systems: Limited but Powerful, *IEEE Spectrum*, Vol. 20, No. 8, pp. 39-45 (1983).
- 5) Pratt, C. A.: An Artificial Intelligent Loco-

motive Mechanic, *Simulation J.*, Vol. 42, No. 1, pp. 40-41 (1984).

6) 辻井潤一: プロダクション・システムとその応用, 情報処理, Vol. 20, No. 8, pp. 735-743 (1979).

7) Davis, R. et al.: Production Rules as a Representation for a Knowledge-Based Consultation Program, *AI*, No. 8, pp. 15-45 (1977).

(昭和 59 年 12 月 6 日受付)

(昭和 61 年 2 月 20 日採録)



栗原 謙三 (正会員)

昭和 23 年 7 月 2 日生。47 年 3 月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。49 年 3 月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社。システム開発研究所に勤務し、現在に至る。生産システムの計画、管理技法に関する研究に従事。日本機械学会、電気学会、IEEE 各会員。



明石 吉三 (正会員)

昭和 17 年 11 月 1 日生。42 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。44 年 3 月同大学大学院理工学部修士課程修了。同年 4 月(株)日立製作所入社。現在、同社システム開発研究所主任研究員。工学博士。この間、生産物流システムを対象にスケジューリング手法、システム分析計画手法の研究に従事。計測自動制御学会、電気学会、IEEE 各会員。



天満 正 (正会員)

昭和 30 年 7 月 2 日生。49 年 3 月徳島県立徳島東工業高等学校卒業。同年 4 月(株)日立製作所入社。システム開発研究所に勤務し、現在に至る。生産システムの計画、管理技法に関する研究に従事。電気学会会員。