
 ショートノート

半導体プロセス診断エキスパートシステム†

栗原 謙三^{††} 小林 隆^{††} 明石 吉三^{††}

半導体製品の微細化が進んだ現在、各工程での作業結果の良否を直接調べることは、あるいは素子構造パラメータと素子特性との関係を解析することがますます困難となりつつある。そのため、TEG と呼ばれる部分試作テストパターンによる素子構造解析や素子特性解析の重要性が増大している。一方、TEG データの解析には、数式モデルに代表される理論的知識だけでなく、技術者の経験的知識が必要である。このような背景から、半導体プロセス診断の迅速化を目的に、組織的に TEG を設計し、その測定データを理論的知識で数値処理するとともに、その数値処理結果を複数技術者の経験的知識で解析する診断システム TEGMAP を開発した。

1. はじめに

半導体製品の高集積化のスピードは目ざましい。製品は最先端のプロセス技術で作らざるを得ないため、工業製品でありながら歩留まりという概念がまかり通っている。このような半導体製造プロセスの異常診断には、熟練技術者の経験的知識が不可欠である。経験的知識としては、定性的な因果関係知識とともに、実験式や理論式などの数式モデルも重要な診断知識である。既に、これら両知識の組合せ活用を特徴とする診断方式を提案した¹⁾。

本提案方式に基づいて診断システムを開発した。本システムの狙いは、①既経験原因の究明については、そのノウハウを知識ベース化し、これを活用することによって省力化する、そして、②技術者の知的能力は未知原因の究明に向けることにある。本論文では、システムの概要と実プロセスへの適用結果を報告する。

2. 知識工学応用プロセス診断方式の概要¹⁾

微細化が進んだ現在、各作業結果の直接検査は困難である。提案方式では、数式モデルを使って完成品を模擬的に分解し、構造上の異常箇所を抽出する。

(1) 診断ステップ1: TEG (Test Element Group: 半導体デバイスの一部を製品ウェハ上に作ったテストパターン群) の電気測定データを数式モデル (実験式、理論式など) で解析し、素子構造パラメータ値

(膜厚など) の異常を推定する。

(2) 診断ステップ2: 素子構造パラメータ値は多種類のプロセスパラメータ値で決まり、装置個々の特性も影響するため、両パラメータ間数式モデルの開発は容易でない。そこで、経験的な現象・原因間因果関係知識をプロダクションルールで記述し、これにより異常原因を究明する (ルール例は文献1) を参照)。

3. プロセス診断システム TEGMAP の開発

3.1 システムの機能構成

TEGMAP は、前記方式に基づいた、次の3解析機能群を有する。(1)項はペレットごとの詳細解析を、(2)(3)項はプロセスの最適条件出しと均一性確認を支援する。

(1) 単一ペレット解析機能群

- ① 素子構造パラメータ値の推定と規格チェック
- ② 原因究明: 究明した原因と、その推論過程を表示。既知情報で断定不能の場合、質疑応答形式で検定。

(2) 2ペレット比較解析機能群: プロセス条件の異なる2ペレットを解析し、その相違を解析。

(3) ウェハ全面解析機能群: ウェハ全面に渡って単一ペレット解析し、ウェハ上の異常発生状況を解析。結果はウェハ上分布マップ (鳥瞰図、等高線図等) で表示。

3.2 マンマシンインタフェース方式

TEGMAP は非定型なプロセス診断業務を対話形式で支援する。しかも、計算機に不慣れたプロセス技術者が、TEGMAP と対話してプロセス診断できなければならない。

† Knowledge Based Process Diagnosis Expert System for LSI Manufacturing by KENZO KURIHARA, TAKASHI KOBAYASHI and KICHIZO AKASHI (Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所システム開発研究所

(1) システム操作性

TEGMAP では、ある解析を実施後、技術者がその結果を判断して次の解析を実行する。この思考の連続性を実現するために、各解析結果の出力画面がアイコンを兼ねる方式を考案した。例えば、ウェハ全面解析結果の画面上で解析対象ペレットをポイントする(図1)。

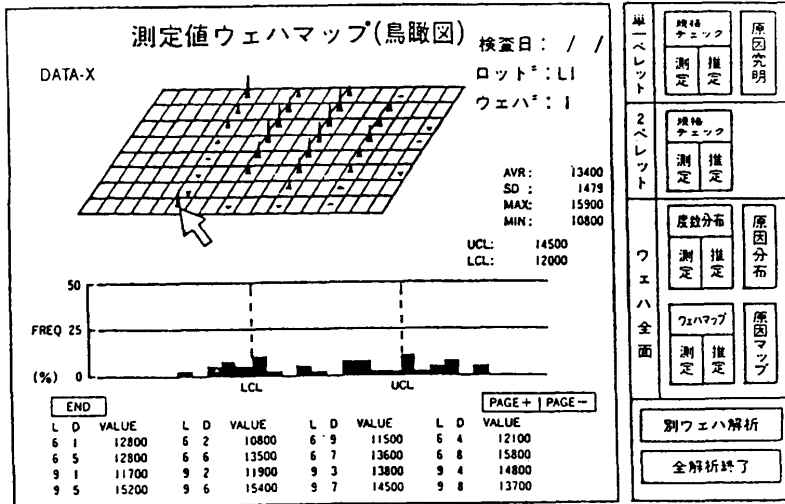


図1 解析結果出力画面のアイコン兼用方式

Fig. 1 Using each picture both as result output and ICON for input.

(2) 出力結果の十分性

計算機出力は判断資料であり、技術者自身が最終判断する。そこで、TEGMAPは、素子構造パラメータの推定と原因究明の根拠を技術者に説明できる。推定に使ったデータと推定式の説明例を図2に示す。

一方、知識ベースだけで診断できない場合、技術者自身が帰納的・直観的に診断する。そこで、途中経過表示機能と、複数解析結果の比較解析機能を設けた。

3.3 ハードウェア・ソフトウェア構成

半導体生産ラインは、生産量増加に伴って増設される。そこで、TEGMAPをワークステーションに搭載して、システム操作性・応答性とともに可搬性を確保した。

解析機能は活用結果を踏まえて追加、修正される。そこで、制御部と各解析部を明確に分離したソフトウェア構造とし、拡張性を確保した(図3)。

TEGMAPはC言語(約20K step)とエキスパートシステム構築ツール(EUREKA)により開発し

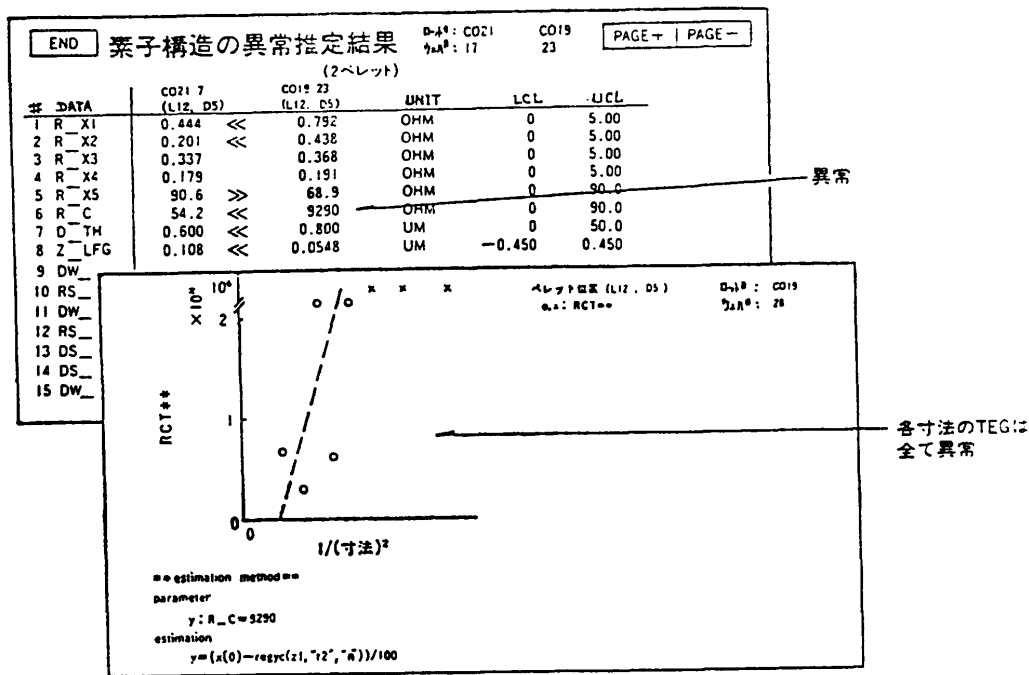


図2 2ペレット比較解析結果とコンタクト抵抗の推定根拠

Fig. 2 Result of two pellet comparison analysis and the estimation process of contact resistance.

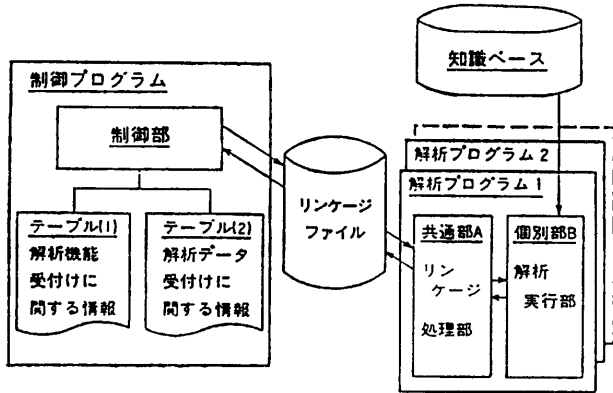


図3 ソフトウェア構成の概念

Fig. 3 Conceptual architecture of TEGMAP software.

た。数式モデル数は約 70, ルール数は約 200 である。なお、ルール数はシステム開発直後に比べ、約 20% の増加に留まるが、内容は強化されている。

4. 実プロセスへの適用と評価

半導体試作ラインで知識を蓄積し、量産ラインを診断した。本章ではシステムの妥当性、効果を考察する。

4.1 適用例1：ゼロ歩留まりウェハの解析

量産ラインの不良ウェハ解析に TEGMAP を活用し、ゼロ歩留まり不良、アクセス時間高速化対策、ウェル濃度不良、などを解析した。一例として、ゼロ歩留まりウェハの不良解析例を示す。

(1) 適用結果：ゼロ歩留まりウェハを単一ペレット解析機能で解析し、原因『コンタクト不良』を抽出した。

(2) 結果の検討：プロセス技術者がシステム抽出の原因を考察した。正常ウェハとゼロ歩留まりウェハを対象として、2ペレット比較解析機能で素子構造パラメータ推定結果を比較し、コンタクト推定値の異常を確認した(図2)。次に、ウェハ全面解析機能により、ウェハ上全ペレットでの本不良の発生を確認した。以上により、自動解析結果を技術者自身が確認した。従来、一週間を要した解析を一日で実施できた。

4.2 適用例2：量産ラインの特性解析

量産ラインでの継続的な不良ウェハの解析に先立ち、上記のようなウェハ解析

により究明した原因の妥当性を検証した。ここでは、ベテラン技術者の判断結果との一致度により、妥当性を評価した。TEGMAP の究明した原因 19 例について調べたところ、8 例は正しいことを確認し、10 例は可能性が大であることを確認した。また、残りの 1 例はさらに詳細な解析が必要であるという結果を得た。

上記のように妥当な結果を得られたことから、量産ラインを対象に半年間に渡り、不良ウェハを継続的に解析した。これら結果を総合的に解析することにより、歩留まりの立上げを支援した。

(1) 適用結果：解析結果例を表1に示す。表では、解析対象ペレットを月日順に示す。

本解析では、異常判定基準を次の2通りに設定し、明らかな異常だけでなく、異常の一步手前と思われるものも解析した。すなわち、①基準1：TEG測定値、素子構造パラメータ推定値が、各々の規格範囲を越えた。②基準2：規格内だが規格限界値に近い(異常発生的一步手前)。本解析では、経験値として規格範囲の上下20%を危険領域とした。

(2) 結果の検討：半導体には歩留まりという概念があるように、常に何らかの原因によって不良品が発生している。一般に、その原因は多数存在しており、どの原因に対する対策が歩留まり向上に有効かを見極める必要がある。TEGMAP による継続的な解析により、量産ラインの特性を把握でき、重点対策の決定に有効であった。

表1 量産ラインの特性解析結果例
Table 1 Characteristic analysis of massproduction line.

原因	ライン	量産ライン X																									
	ロット ^a	M																									
	ウェハ ^b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
異常原因	検査日 ^c	*月																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
現象1	原因 A																										
	// B																										
	// C																										
	// D																										
// 2	// E																										
	// F																										
	// G																										
// 3	// H																										
// 4																											

(記号説明) ■ 異常('基準1'で判定)
 □ 異常一步手前('基準2'で判定)

TEGMAP 活用の典型例を以下に示す。ここで、解析期間を、前期、中期、後期の3段階に区分して考察した。

(i) 活用の成功例

・原因F；中期まで散発。その間、異常一步手前の発生も少ない。技術者は、この自動診断結果から、プロセスが異常例にずれたのではなく、変動していたことを知り、事前に対策を打てた。

・原因C；異常一步手前が中期から散発し、システムは要注意を示唆している。早期対策が不可欠である。

(ii) 活用の部分的成功例

・原因B；初期の対策で不良は一応消滅。TEGMAP は、その間も異常一步手前の発生を検知できたが、異常には至っていなかったので対策を後回しにした。その結果、後期に不良を多発させてしまった。

(iii) 活用の失敗例

・原因A；前期には、異常一步手前が多発。これにより、技術者はプロセスの異常側へのずれを察知していたが、対策が遅れた。

4.3 TEGMAP の評価

半導体プロセスで発生する異常原因は、パラメトリック不良とランダム不良に大別できる。前者は設計値・プロセス条件などの不良に起因する連続的な不良であり、後者は異物混入などに起因するランダム不良である。TEGMAP は、前者を対象として、試作ライン・他ラインにおける既経験の異常原因を効率的に解析するものである。システム評価に当たっては、パラメトリック不良について、解析結果を専門家に評価させ、順次ルールを改良した。その後、実プロセスへの適用を通して、妥当な診断結果を得ることができ、ルール表現した診断知識および診断方式の有効性を確認した。

また、TEGMAP の活用によってプロセス技術者の省力化が図れ、大量の測定データを迅速・定量的に解析することができ、ライン特性を明確に把握できた。これによって、歩留まりの早期立上げのための対策を効果的に打つことができた。

5. あとがき

定量的な数式モデルと定性的な現象・原因間因果関係知識との組合せ活用を特徴とする診断方式を提案し、本方式に基づく半導体プロセス診断エキスパート

システムを開発した。本システムを実プロセスに適用し、診断結果の妥当性とシステムの適用効果を考察した。

謝辞 本研究について御指導、御討論を頂いた(株)日立製作所武蔵工場目黒怜主任技師、システム開発研究所副所長春名公一博士に感謝致します。

参考文献

- 1) 栗原はか：知識ベースに基づく半導体プロセス診断方式，情報処理学会論文誌，Vol. 27, No. 5, pp. 541-551 (1986)

(昭和63年10月14日受付)

(平成元年5月9日採録)



栗原 謙三 (正会員)

昭和23年7月2日生。昭和47年3月早稲田大学理工学部機械工学科卒業。昭和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)日立製作所に入社し、シ

ステム開発研究所に勤務。現在、同研究所主任研究員。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、計測自動制御学会、IEEE 各会員。



小林 隆 (正会員)

昭和31年生。昭和55年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。昭和57年同大学院修士課程修了。同年、(株)日立製作所入社。システム開発研究所において、知識工学応用

システム、計算機周辺装置の制御などの研究に従事。電気学会、計測自動制御学会、IEEE 各会員。



明石 吉三 (正会員)

昭和17年11月1日生。昭和42年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和44年3月同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

ステム開発研究所川崎分室長。工学博士。生産・流通等の情報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。