

	くじのりお
氏名	久慈 憲夫
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成9年11月12日
学位授与の法的根拠	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和50年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学位論文題目	電子ビームテストによるLSI故障診断の高効率化 に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 横尾 邦義 東北大学教授 水野皓司 東北大学教授 室田 淳一

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

LSIの大規模化とともに、設計バグの除去、製造歩留まりの向上、高信頼性を短期間で実現するための技術として、LSI内部の故障箇所を特定する故障診断技術が重要になってきている。このような故障診断を容易にするために、LSI内部を非接触で直接診断する電子ビームテストが開発されている。しかしながら、従来の電子ビームテストは、オシロスコープと同様な測定器にすぎなかったため、大規模なLSIへの適用は極めて困難であった。特に論理LSIでは、1)配線パタンの配置はランダムであり、診断箇所を特定することは設計者でさえ難しいこと、2)動作が複雑なため、故障診断のための観測回数や比較のための論理期待値データ量が増大し、診断所要時間が長大になること、3)配線の多層化とともに多くの配線が層間絶縁膜の下となり、電子ビームによる観測性の低下すること、等が大きな障害であり、これらの問題を解決することが、電子ビームテストによる故障診断技術の実用化のために不可欠の課題であった。

本論文では、上記課題を解決するため、LSIの設計データベースと電子ビームテストとを結合するというコンセプトに基づき、診断箇所抽出と故障箇所追跡を自動化する技術、並びに故障診断と論理期待値作成を高速化する技術を開発した。更に、多層配線LSIの観測性を向上するため、観測用パッドをLSI内部の全ての回路ノードに設計段階で自動配置する技術を開発した。以上の技術開発を基に、電子ビームテストによるLSIの故障診断の高効率化を図った。

### 第2章 診断箇所自動化のための配線地図照合技術

電子ビームテストでは、観測したい回路ノードを回路図上で決定し、対応する診断箇所の配線を観測像上で識別し、その上に電子ビームを位置決めすることで波形観測が行われる。従来の電子ビームテストでは、これらの作業が全て人手で行われていたため、配線数が膨大な論理LSIでの診断は、事実上困難であった。

この問題を解決するために、電子ビームテストの診断箇所を自動的に求める配線地図照合技術を開発した。この配線地図照合技術を電子ビームテストの中に取り入れることにより、回路ノード名を指定するだけで、自動的にLSIチップ上の配線を探しだし、波形を観測するシステムを実現した。自動化の仕組みは、1)回路ノードと設計配線パターンとの間の対応関係を示す配線地図を作成すること、2)回路ノードに対応した最適な観測ゾーンを配線地図に基づいて決定すること、3)配線地図の座標系とLSIを搭載するステージ位置を連結し、観測ゾーンに対応する配線地図を常に表示すること、4)配線地図と観測像を画像マッチングさせることで電子ビーム照射位置の正確な座標を得ること、5)得られた座標位置に電子ビームを自動照射し電圧波形を観測すること、からなる。開発したシステムを実際の論理LSIに適用し、大規模LSIの

波形観測を効率化する上で、診断箇所自動化が極めて有効であることを実証した。

### 第3章 故障箇所自動追跡のための設計論理地図照合技術

故障は回路ノード間を伝搬していくため、LSIの故障診断を行うには、各配線の電位状態が故障かどうかを判定し、配線間の故障伝搬を故障箇所に向かって追跡する必要がある。論理LSIでは、多数の配線がランダムに配置されているため、従来の電子ビームテストでは、故障配線の特定や故障配線間の信号伝搬を認識することは難しく、故障診断は困難であった。

この問題を解決するため、論理シミュレーションで得た論理期待値と回路ノード名を各配線データに付与して得られる設計論理地図を、LSI設計データベースより作成する技術を開発した。設計論理地図は、電位ハイの配線は赤く電位ロウの配線は青くというような色分けをしたもので、電子ビームテスト観測像と一対一に対応する設計上の期待値画像である。この設計論理地図を電子ビームテストに取り入れ、観測像との照合を行うことにより、故障箇所を自動的に追跡する診断システムを実現した。診断自動化の仕組みは、1) 設計論理地図をLSI設計データベースより生成すること、2) 観測像と設計論理地図間を画像照合により自動的に位置合わせすること、3) 両画像間を比較して論理不一致となる故障配線を抽出すること、5) 抽出した故障配線の回路ノード名を特定すること、6) 故障回路ノード名に基づいて故障伝搬経路を追跡し、故障発生源を特定すること、等の過程からなる。本技術を、実際の論理LSIの故障診断に適用し、故障診断自動化の有効性を実証した。

### 第4章 故障診断高速化のための論理深度地図照合技術

良品デバイスが存在する場合や、動作条件によって正常な動作状態が現れる場合には、良品状態と不良品状態の電位コントラスト像を観測し、両観測像間の差像により故障診断を行う故障像法が提案されている。しかしながら、従来の故障像法では、パルス電子ビームを用いるストロボ観測法が前提であったため、像観測に時間がかかり、論理LSIには適用が困難であった。また、LSIチップ全面から電位コントラスト像を取得する必要があったため、膨大な数の観測像数が必要であった。

これらの問題を解決するために、1) 連続電子ビームにより高速に故障像を観測するスタティック故障像法を導入して観測時間を短縮し、2) 故障配線に沿った領域のみを順次観測する手法により、観測像数の大幅な削減を図った。しかしながら、1) では観測像の時間分解能が低くなるため、配線間の故障伝搬の追跡が困難であり、2) では故障診断手順の定式化が不十分なため、故障箇所に必ずしも到達できないという問題があった。そこで、3) LSI設計データベースより論理深度地図を作成し、これを参照することで故障像の観測位置と観測時刻を決定する手法を導入した。論理深度地図とは、故障配線より上流側にある記憶素子の配置図であり、これを観測した故障像と重ね合わせることで、上流側の故障配線が明瞭に識別できる。1) 2) 3) の手法の導入により、故障像の観測時間と観測回数を最小に保ったまま、故障を常に上流側に向かって追跡することが可能となった。実際のLSIの設計データによる評価の結果、従来の故障像法に比べて、故障像の観測回数を二桁以上も削減できる見通しが得られた。更に、本手法を実際の論理LSIに適用し、その有効性を確認した。

### 第5章 論理期待値作成高速化・効率化のための診断経路追跡技術

電子ビームテストの故障追跡方法として、ガイドドプローブ法がある。これは、電子ビームテストの観測波形と論理シミュレーションで得られた期待値波形とを比較し、外部端子から回路の内部に向かって故障経路を追跡するものである。しかしながら、診断にはLSI内部の全回路ノードの期待値データを事前に作成する必要があるため、LSIの大規模化とともにそのデータ量が莫大となり、作成のための論理シミュレーションのCPU時間も大幅に増大する問題があった。

そこで、一回の論理シミュレーションで全ての回路ノードの論理期待値を作成するのではなく、回路を幾つかの領域に分割し、期待値を求めるべき回路領域を故障追跡の過程で選択し、回路領域毎に論理期待値を作成していく方法を検討した。本方法によれば、論理シミュレーションを複数回実行することになるが、故

障追跡経路上にない回路領域が除外されるため、データ量の大幅な削減を図ることができる。期待値を求めべき回路領域の選択法として、1) 故障追跡経路上の回路ノードから上流に存在する一定の論理段数の範囲にある回路ノードの集合（コーンと呼ぶ）を選択するコーン法と、2) 故障追跡経路上の回路ノードから上流に存在する機能ブロック内部の回路ノードを選択するブロック法を提案した。両手法を100kゲートの論理LSIの設計データを用いて評価した。その結果、一回の論理シミュレーション当たりを選択する回路領域の回路ノード数を最適化することで、従来方法に比べて、CPU時間で1/700、データ量で1/40の削減効果があることを確認した。

## 第6章 故障診断容易化のためのLSI設計技術

集積回路プロセス技術の進展と共に配線の多層化がすすみ、LSI内部では多くの配線が厚い絶縁膜の下を通るようになってきている。その結果、電子ビームテストにより可観測となる回路ノード数の比率（可観測性）が低下し、故障診断がますます困難になっている。

そこで、電子ビームプローブのための観測用パッドを、LSIの設計段階で最上層配線上に配置し、観測性を向上させる技術を開発した。本技術の特徴は、1) レイアウト設計が終了したあとのマスクパタンの空き領域に観測用パッドを配置すること、2) 完全平坦化プロセスで実現された積層型ビア（下層配線と最上層配線を層間接続するためにスルーホールを縦積みにした構造のビア）を用いて観測パッドを小型化したこと、3) 観測パッドを一つの回路ノードに一つ配置することで観測パッド数を最小化したこと、があげられる。その結果、多数の回路ノードに観測用パッドを配置したにも関わらず、チップサイズが不変で、かつ回路動作への影響の少ない配置技術を実現した。実際のLSIのレイアウト設計データに観測用パッドを配置し評価を行った結果、390kゲートの論理LSIにおいて、可観測性が13.0%から88.5%まで向上する結果を得た。

## 第7章 結論

本研究では、電子ビームテストによる大規模LSIの故障診断を可能とするため、下記の技術を開発した。

- 1) LSI設計データベースと電子ビームテストとの結合を実現し、LSIチップ上の配線パターンと回路図上の回路ノードとを対応づける配線地図照合技術を開発することで、診断箇所の抽出を自動化した。
- 2) 結合したLSI設計データベースから、設計上の期待値像に対応する設計論理地図を作成し、観測像と自動照合することで、故障箇所の追跡を自動化した。
- 3) 良品デバイスを期待値に用いる故障像診断法において、設計データベースから作成した論理深度地図を故障像と照合する技術を開発することで、故障像の観測回数を大幅に削減し、故障診断を高速化した。
- 4) ガイデッドプローブ法のための期待値データ作成を効率よく行う方法として、コーン法とブロック法を提案し、期待値作成に要する論理シミュレーションのためのCPU時間とデータ量を大幅に削減した。
- 5) 配線が多層化し電子ビームテストによる観測性が低下する問題を取り上げ、レイアウト設計後のマスクパターンデータに観測用パッドを配置する設計技術を開発し、観測性を大幅に向上した。

以上の技術開発により、電子ビームテストによる故障診断の高効率化を実現した。

## 審査結果の要旨

L S I の開発や生産段階で発生する故障箇所の検出や診断を短時間に行うことは、L S I の大規模化に伴いますます重要になっている。このため、L S I 内部を非接触で直接診断する電子ビームテストが開発されているが、診断に長時間を要するなど大規模なL S I への適用は困難であった。

著者は、L S I の設計データベースを電子ビームテストに有効に活用するためのいくつかの技術を開発し、故障診断の自動化と高速化を実現した。本論文はその成果をとりまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、設計回路図上で観測したい回路ノード名を指定するだけで、電子ビームテストの診断箇所を自動的に抽出する配線地図照合技術を開発し、実際の論理L S I に適用し、この技術が診断箇所設定の自動化にきわめて有効であることを示している。

第3章では、設計上の論理期待値像をL S I 設計データベースより作成して、電子ビームテストの観測像と自動照合する設計論理地図照合技術を開発し、論理L S I の故障診断に適用し、その有効性を確認した結果について述べている。これは、故障箇所を自動的に特定する上で重要な技術であり評価できる。

第4章では、一部に不良品が生じたり、動作条件によっては故障の発生する場合の診断において、故障箇所や条件を高速に特定するために開発した論理深度地図照合技術について述べている。これは、故障箇所より上流側の論理深度地図をL S I 設計データベースより作成し、故障像と照合するもので、従来技術に比べて観測回数を2桁程度削減できることを実証した重要な成果である。

第5章では、故障診断に必要な論理期待値の領域を故障追跡の過程で随時設定する手法を開発し、論理期待値作成のためのC P U 時間とデータ量を大幅に削減した結果について述べている。

第6章では、電子ビームテストの可観測性がL S I 配線の多層化と共に急激に低下する問題を取り上げ、レイアウト設計後に観測用パッドを最上層に自動配置する設計法を開発し、可観測性を大幅に改善できることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、L S I の設計データベースを活用して電子ビームテストによるL S I 故障診断の自動化と高速化を実現したもので、電子工学、半導体工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。