

不確かなテスト集合による多重縮退故障の診断

山本 幸大[†] 高橋 寛^{††} 樋上 喜信^{††} 高松 雄三^{††}

[†] 愛媛大学大学院理工学研究科

〒790-8577 愛媛県松山市

^{††} 愛媛大学工学部情報工学科

〒790-8577 愛媛県松山市

あらまし 半導体の微細化に伴って多重縮退故障に対する診断法の開発が望まれている。また、最近の BIST 環境に
適応可能な故障診断法の開発も望まれている。本稿では、BIST 環境における不確かなテスト集合による多重縮退故
障に対する故障診断法を提案する。提案する故障診断法の特徴は、1) 検出テストによって検出できる故障数が異な
ることに着目し、検出故障数が少ないテストによって検出された故障を故障候補として推定すること、2) 推定され
た故障候補から非検出テストでN回以上検出される故障を削除すること、および3) 非検出テストおよび検出テスト
における故障候補の検出回数、および回路の構造的な情報に基づく評価に従って故障候補の順位付けを行うことであ
る。最後に、提案手法を ISCAS ベンチマーク回路に適用した評価実験結果を示す。

キーワード 組込み自己テスト, 故障診断, 多重縮退故障, 不確かなテスト集合

Diagnosis for Multiple Stuck-at Faults by Ambiguous Test Set

Yukihiro YAMAMOTO[†], Hiroshi TAKAHASHI^{††}, Yoshinobu HIGAMI^{††}, and Yuzo
TAKAMATSU^{††}

[†] Graduate School of Science and Engineering, Ehime University
Matsuyama, Ehime, Japan

^{††} Dept. of Computer Science, Faculty of Engineering, Ehime University
Matsuyama, Ehime, Japan

Abstract With the scaling of LSI feature size and increasing complexity of LSI, it is necessary to develop a method
for diagnosing multiple stuck-at faults. Recently, the fault diagnosis under Built-In Self Test (BIST) environment
is demanded because BIST is as effective in testing. However, the fault diagnosis under BIST environment is more
difficult because only limited information for making the test set for diagnosis is available in highly compacted
signatures. Therefore the detecting test set that is identified in BIST session includes un-detecting tests. In this
paper, we propose a method for diagnosing multiple stuck-at faults under BIST environment. The fundamental
features of the method are 1) to deduce candidate faults in recognizing that the number of detected faults are
difference among tests in the ambiguous detecting test set, 2) to remove the candidate faults that are detected N
times by un-detecting tests to reduce the number of candidate faults, and 3) to rank the candidate faults based on
the information about detection times in the detecting tests and the un-detecting tests and the information about
circuit structure. Finally we evaluate the effectiveness of the proposed method by experiments conducted on the
ISCAS benchmark circuits.

Key words Built-In Self Test (BIST), fault diagnosis, multiple stuck-at faults, ambiguous test set

1. まえがき

LSIの微細化技術の進展ならびに高集積化・高速化に伴い、故障診断において単一縮退故障以外の故障モデルを考慮することの必要性が増している。そこで、最近の論文[2],[4],[7],[8]では、多重縮退故障、ブリッジ故障、およびオープン故障に対する故障診断法が提案されている。

また、近年、組み込み自己テスト(BIST)の導入が進み、BIST環境に適應できる有効な故障診断法の開発が望まれている[1],[3],[5],[6],[10]。しかしながら、BISTにおいては、検査結果として得られる出力署名が高圧縮のため、これまでに提案された手法を適用してテストを検出テストと非検出テストに識別した場合、識別された検出テストによるテスト集合に非検出テストが誤って含まれてしまう[1],[3],[10]。したがって、BISTによる故障検査によって得られた出力署名に基づいて識別された検出テスト集合は、予期しない非検出テストを含んだ不確かな検出テスト集合となる。

また、BIST環境では、検出テストで観測する外部出力やフリップフロップの位置を知ることは一般に困難である[1],[9]。しかしながら、これまでに提案された故障診断法[2],[4],[7],[8]では、誤りを観測した外部出力(フルスキャン化された回路の場合はフリップフロップの位置)の情報を積極的に利用して故障候補数を削減している。

これまで我々が知る限りでは、不確かなテスト集合によって故障候補を推定する手法、および故障回路で誤り出力が観測された外部出力や誤りを取り込んだフリップフロップの情報を利用しないで故障候補を推定する手法はないようである。したがって、BIST環境での現実的な故障診断においては、不確かなテスト集合によって故障回路における検出/非検出情報のみを利用して、故障の位置を推定する故障診断法の開発が必要である。

そこで、我々は、既に、不確かなテスト集合による単一縮退故障に対する故障診断法、および診断結果として得られた故障候補に基づいて不確かな検出テスト集合に含まれている非検出テストの候補を指摘する手法を提案した[5],[6]。

更に、被検査回路において複数の縮退故障が存在する多重縮退故障に対する故障診断法の開発も必要であることから、本稿では、不確かなテスト集合による多重縮退故障の故障診断法を提案する。BIST環境において、不確かなテスト集合による故障回路における検出/非検出情報のみを利用して、多重縮退故障の診断を行う手法はこれまで提案されていないようである。

本故障診断法の特徴は、

- 1) 故障候補数の増加を抑制するために、検出テストの検出故障数の違いに着目し、検出故障数の少ないテストによって推定された故障候補集合によって不確かな検出テスト集合に属するテストが検出テストになるか否かを判定すること、
- 2) 非検出テストによる故障候補の削除の際に非検出テストによる故障の検出回数に閾値を設定することによって、存在する故障の見逃しを防ぐこと、および
- 3) 故障候補に対する検出テストおよび非検出テストの検出回

数に基づく評価、および故障候補における回路の構造的な情報に基づく評価に従った故障候補の順位付けを行うことである。

本稿は以下のような構成である。第2章では、準備として提案する故障診断法で用いる用語を定義する。第3章では、多重縮退故障の診断へ適応可能な故障診断法を述べる。第5章では、提案した故障診断法をISCASベンチマーク回路に適用した評価実験結果を示す。

2. 準備

ここでは、提案手法を説明する準備として用語の定義を行う。被検査回路の外部出力で得られた応答からテストを次のように定義する。

定義 1: テストが印加された被検査回路において、少なくとも一つの外部出力の値が期待値とは異なるならば、そのテストを検出テストと呼ぶこととする。一方、被検査回路においてすべての外部出力の値が期待値と同一ならば、そのテストを非検出テストと呼ぶこととする。

一般に、BIST環境では、多数のテストが被検査回路に印加されている。しかしながら、故障診断に必要な記憶容量を削減するために、故障診断では、BISTで印加したテストの一部を診断に用いる。そこで、文献[1],[3],[10]で提案された手法を適用して、BIST環境で出力応答を圧縮した署名に基づいて被検査回路に印加したテストから検出テストと非検出テストを識別し、その結果から検出テスト集合と非検出テスト集合を求めることができる。しかしながら、文献[1],[3],[10]で提案された手法を利用し、署名に基づいて検出テストの識別を行う場合、被検査回路の非検出テストを誤って検出テストとして識別してしまう場合がある。したがって、BIST環境で得られた署名に基づいて識別された検出テストからなる検出テスト集合には誤って被検査回路に対する非検出テストが含まれてしまう。一方、被検査回路に存在する故障がBISTによる故障検査において非常に多くの検出テストをもつ場合、BIST環境で得られた署名に基づいて非検出テストの識別を行う際、被検査回路の検出テストを誤って非検出テストと識別してしまうことがある。

そこで、以下のようにテスト集合を定義する。

定義 2: 被検査回路に対する検出テスト集合を T_d とする。いま、非検出テストを tu_j とすると、 $ADT_set = T_d \cup \{tu_1, \dots, tu_n\}$ からなるテスト集合を不確かな検出テスト集合とする。また、被検査回路に対する非検出テスト集合を T_u とする。但し、 ADT_set と T_u には共通するテストはない。

本稿では、BISTによる故障検査の結果である署名に基づいて識別されたテストからなるテスト集合は、不確かな検出テスト集合および非検出テスト集合とする。

以後、提案する故障診断法を説明するために、不確かな検出テスト集合と非検出テスト集合からなるテスト集合 ($AT_set = ADT_set \cup T_u$) を不確かなテスト集合と呼ぶことにする。

定義 3: 診断の結果から被検査回路内に存在すると推定された故障を故障候補と呼ぶ。また、故障候補の集合を故障候補集合 CF_set と書くことにする。

3. 多重縮退故障診断法

3.1 提案手法の概要

提案手法は、以下の2つのフェーズで構成されている。

フェーズ1 検出故障数が少ないテスト ($t \in ADT_set$) に着目して故障候補を推定し、推定された故障候補から非検出テスト ($t \in Tu$) で複数回検出された故障を削除する手法である。

フェーズ2 故障の検出回数と回路の構造的情報に基づいて評価を計算し、その評価に基づいて故障候補を順位付けする。

フェーズ1における故障診断結果としては、故障候補の集合が得られる。次に、フェーズ2における故障診断結果としては、フェーズ1で推定された故障候補が評価にしたがって順位付けされた故障候補集合が得られる。

提案手法の概要を図1に示す。

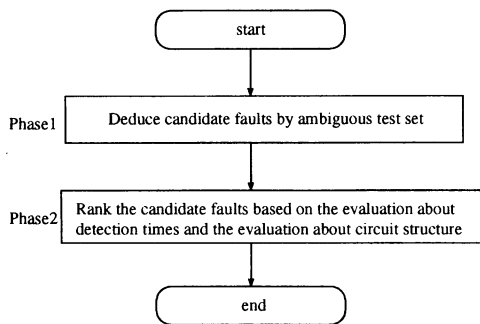


図1 多重縮退故障診断法の概要図

3.2 故障診断法 フェーズ1

不確かなテスト集合による多重縮退故障診断法においては以下の前提のもとに診断を行う。

前提: BIST環境で得られた署名に基づいてテストを識別する際に、非検出テストを検出テストと識別する場合があります。識別された検出テストからなるテスト集合には非検出テストが含まれる(不確かな検出テスト集合)。但し、被検査回路に印加したテストにおける、すべての検出テストが不確かな検出テスト集合に含まれていなくてもよい。一方、非検出テスト集合には検出テストは含まれないとする。

提案する多重縮退故障診断では、以下の基本的な考え方に基づいて故障候補を推定する。

考え方1: 不確かな検出テスト集合に属するすべてのテスト ($t \in ADT_set$) は、故障候補集合に属する故障の少なくとも一つの故障を検出する。

フェーズ1では、考え方1に基づいて、不確かな検出テスト集合に属するできるだけ多くのテストが検出テストとなるようなできるだけ少ない故障候補を推定することを試みる。そこで、テストによって検出できる故障の数が異なることに着目して、検出故障数の少ないテストから利用して故障候補を推定する。

フェーズ1では、故障候補数が増加することを抑えるために、先に我々が提案した故障診断法 [5], [6] において行っていた、不確かな検出テスト集合に属するテスト毎に検出された故障を要

素とする集合の和を故障候補集合とする処理を行わない。

我々が提案した故障診断法 [5], [6] においては、積極的に非検出テストを利用して、被検査回路に存在しないと推定される故障を故障候補集合から取り除くことによって故障候補数を削減していた。本稿で提案する多重縮退故障に対する故障診断法においても、非検出テストの検出情報を積極的に利用して故障候補数の削減を試みる。しかしながら、一般に多重縮退故障が被検査回路に存在する場合、故障間にマスク関係が生じ、多重縮退故障のもとでは非検出テストとなるテスト ($t \in Tu$) によって多重縮退故障を構成する個々の故障が、検出される可能性がある。このような故障のマスク関係を考慮しないで、非検出テストによって検出された故障を故障候補集合から除くと、被検査回路に存在する故障を見逃してしまう。

そこで、本稿で提案する手法では、次の考え方2に基づいて非検出テストを利用した故障候補の削減を行う。

考え方2: 多重縮退故障のもとで故障間にマスク関係が生じていても、多くの非検出テストによって検出される故障は被検査回路に存在しない。

フェーズ1では、考え方2に基づいて、ある程度以上の非検出テストによって検出された故障を故障候補集合から取り除くことによって故障候補数の削減を試みる。非検出テストによる故障候補の検出回数に対して閾値を設定することによって被検査回路に存在する故障を見逃すことによる診断精度の悪化を抑えることができる。

フェーズ1では、考え方1および2に基づいて、不確かなテスト集合における単一縮退故障シミュレーションの結果を用いて故障候補を推定する。

フェーズ1の処理手順を以下に示す。

フェーズ1

入力:

- 不確かなテスト集合 ($AT_set = ADT_set$ (不確かな検出テスト集合) $\cup Tu$ (非検出テスト集合))
- 非検出テストの検出回数の閾値 N
- 故障候補集合 CF_set (CF_set の初期値は空)

出力:

- フェーズ1で推定された故障候補集合 CF_set

ステップ1: すべてのテスト $t \in ADT_set$ (不確かな検出テスト集合) に対して、単一縮退故障シミュレーションを行う。それぞれのテストが検出する代表故障数を求め、検出できる故障数の昇順に ADT_set に属するテストを並び替える。但し、検出故障数が0個のテストがあるならば、そのテストを選択済みとする。

ステップ2: ADT_set において未選択として残っているテストの中で最も検出故障数が少ないものを選択する。

ステップ3: 選択したテストによって検出可能な故障を故障候補集合 CF_set に加える。

ステップ4: すべてのテスト $t \in Tu$ (非検出テスト集合) によって CF_set に属する故障候補の検出回数を求める。もし、すべてのテスト $t \in Tu$ (非検出テスト集合) によって N 回以上検出された故障候補があるならば、その故障候補を CF_set

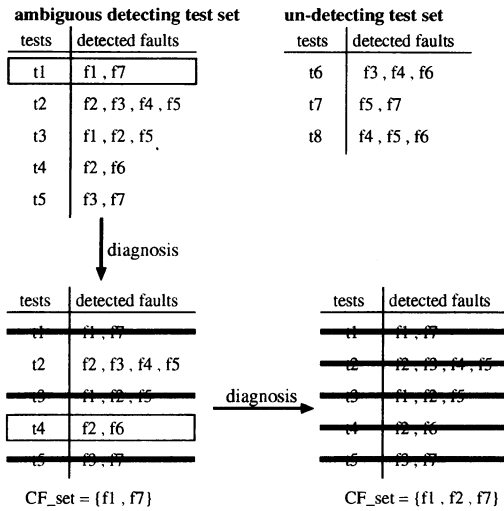


図2 フェーズ1の適用例

から削除する。

ステップ5: ADT_set における未選択のテストが、 CF_set の少なくとも一つの故障を検出できるか否かを判定する。

もし、選択したテストが故障を検出できなければ、そのテストは未選択として ADT_set に残す。

もし、選択したテストが少なくとも一つの故障を検出できれば、そのテストは選択済みとなる。

ステップ6: すべてのテスト $t \in ADT_set$ が、選択済みとなればフェーズ1の処理を終了する。もし、 ADT_set に未選択のテストがあるならば、ステップ2へ戻る。

次に、図2を用いてフェーズ1の適用例を示す。いま、故障 $f1$ および $f2$ をもつ被検査回路に対するBISTによる故障検査の結果から、図2に示すような不確かな検出テスト集合 $ADT_set = \{t1, t2, t3, t4, t5\}$ 、および非検出テスト集合 $Tu = \{t6, t7, t8\}$ が得られたとする。フェーズ1における故障削減のための検出回数の閾値を $N = 2$ とする。

1: すべてのテスト $t \in ADT_set$ に対して、そのテストが検出可能な故障を調べる。その結果は図2に示すようになる。

2: テスト $t \in ADT_set$ の中で検出故障数が最小である $t1$ を選択する。

3: $t1$ によって検出可能な $f1$ および $f7$ を、故障候補集合 CF_set に加える。

4: いま、すべてのテスト $t \in Tu$ において、 $N(=2)$ 回以上検出可能な故障候補は存在しないので故障候補は削除できない。

5: テスト $t \in ADT_set$ に対して、 $CF_set = \{f1, f7\}$ の少なくとも一つの故障を検出できるか否かを判定する。判定の結果からテスト $t1, t3$ 、および $t5$ を選択済みとする。

6: 未選択なテスト $t2$ および $t4$ に対して2から5で述べた処理を行う。まず、 $t4$ が選択され、そのテストで検出できる故障を故障候補に加えると $CF_set = \{f1, f2, f6, f7\}$ が得られる。

7: いま、すべてのテスト $t \in Tu$ において、 $N(=2)$ 回以上検

出可能な故障候補は $f6$ であり、それを CF_set から削除する。
 8: $CF_set = \{f1, f2, f7\}$ の少なくとも一つの故障をすべてのテスト $t \in ADT_set$ が検出できたので、故障診断を終了し、故障診断の結果を $CF_set = \{f1, f2, f7\}$ とする。

3.3 故障診断法 フェーズ2

フェーズ1で得られた故障候補に対して、被検査回路に存在する故障である可能性を計る評価を導入し、その評価にしたがって故障候補の順位付けを行う。

提案する多重縮退故障診断法では、以下の基本的な考え方に基つて評価を計算する。

考え方3: 多重縮退故障においても、被検査回路に存在する故障は、多くの検出テストによって検出される。一方、存在する故障は、ほとんどの非検出テストで検出されない。

考え方3より、故障候補に対する検出テストおよび非検出テストの検出回数に基づく評価を導入する。

考え方4: 回路の構造的に外部出力側に位置する故障候補は、その故障候補の位置よりも外部入力側に存在する真の故障の影響によって推定された可能性がある。

考え方4により回路の構造的な情報に基づく評価を導入する。このように回路の構造的な情報を故障診断のための評価として導入することは、文献[11]においても行われている。

フェーズ2においては、考え方3および4に基つて次のような評価を導入する。

評価を算出する際、不確かな検出テスト集合および非検出テスト集合における故障候補の検出回数、および故障候補をもつ信号線に対する外部出力からの構造的なレベルの情報を用いる。

故障候補総数 n 個、 $f_{\alpha i}$ について、($i = 1, 2, \dots, n$)
 評価 E_1 n 個の故障候補を、不確かな検出テスト集合に属するテストでの検出回数で降順に並べ替えたときの $f_{\alpha i}$ の順位 $[DT_rank(f_{\alpha i})]$

評価 E_2 n 個の故障候補を、非検出テスト集合に属するテストでの検出回数で昇順に並べ替えたときの $f_{\alpha i}$ の順位 $[UDT_rank(f_{\alpha i})]$

評価 E_3 $f_{\alpha i}$ の外部出力からの構造的なレベル $[Level(f_{\alpha i})]$

フェーズ2では、以下の手順で故障候補に対する評価を算出する。

入力:

- 不確かなテスト集合 ($AT_set = ADT_set$ (不確かな検出テスト集合) $\cup Tu$ (非検出テスト集合))
- 信号線のレベル
- フェーズ1で推定された故障候補集合 CF_set

出力:

- 順位付けされた故障候補集合 CF_set

フェーズ2

すべての故障候補 $f_{\alpha i} \in CF_set (i = 1, 2, \dots, n)$ に対して以下の処理を行う。

ステップ1 $f_{\alpha i}$ に対する評価 E_1 を求める。

$$E_1 = \frac{1}{DT_rank(f_{\alpha i})} \quad (1)$$

ステップ2 $f_{\alpha i}$ に対する評価 E_2 を求める。

$$E_2 = \frac{1}{UDT_{rank}(f_{\alpha i})} \quad (2)$$

ステップ3 $f_{\alpha i}$ に対する評価 E_3 を求める。但し、 MAX_LEVEL は構造的な回路レベルの最大値を表す。

$$E_3 = \frac{Level(f_{\alpha i})}{MAX_LEVEL} \quad (3)$$

ステップ4 ステップ1から3で求めた評価より、 $f_{\alpha i}$ に対する評価 $E_{f_{\alpha i}}$ を求める。

$$E_{f_{\alpha i}} = E_1 \times E_2 \times E_3 \quad (4)$$

4. 故障診断実験結果

評価実験では、ベンチマーク回路のそれぞれの回路に対して、2重、3重、および4重縮退故障をもつ回路を準備した。使用計算機はPENTIUM 4 3.2GHzである。

ここでは、不確かなテスト集合は、1024個のランダムパターンで構成されている。本実験では、不確かな検出テスト集合の確からしさを95%に設定して診断を行った。不確かな検出テスト集合の確からしさは、不確かな検出テスト集合に含まれる検出テスト数の割合を表したものである。

検出テスト数が100個以下の縮退故障をランダムに選択し、2個、3個、または4個の故障を挿入した回路が故障回路である。実験では、2重縮退故障に対しては100個の故障回路を、3重および4重縮退故障に対しては50個の故障回路をそれぞれ準備した。

表1では、全ベンチマーク回路での診断成功率、および平均処理時間をそれぞれ示している。診断成功率の欄には、次式で定義する評価を示している。

診断成功率 (%) = (目標値以下の故障候補に挿入した故障が少なくとも一つは含まれている診断結果) ÷ (故障回路の総数) × 100

ここでは、文献[12]を参考にして故障候補数の目標値を20個とした。診断成功率が100%ならば、すべての故障回路において20個以下の故障候補数の中に挿入した故障が少なくとも1個は指摘されたことを示している。実験結果から、故障の多重度が増加しても、99%以上の診断成功率で診断を行えることがわかった。また、処理時間の欄には、故障候補を指摘するために費した処理時間を示す。

表1 2~4重縮退故障に対する診断成功率と処理時間

	2重縮退故障	3重縮退故障	4重縮退故障
診断成功率 (%)	99.7	99.9	99.5
処理時間 (sec)	71.89	92.01	105.30

図3は、フェーズ1で指摘した故障候補をフェーズ2で求めた評価にしたがって順位付けを行った結果から、最初に被検査回路に存在する故障が指摘された順位 (*FirstHit*) の分布を示している。実験結果からほとんどの故障回路において被検査回路に存在する故障の少なくとも一つの故障は第一位の順位をもつことがわかった。

最後に、表2においては、各回路の平均の診断結果を示す。2重、3重、および4重縮退故障の *suc.ratio* の欄は、各回路での診断成功率を示す。また、*hit1* の欄では、故障候補の中に挿入した故障が1個含まれていた故障回路の割合を示す。*hit2*, *hit3*, および *hit4* は、挿入した故障がそれぞれ2個、3個および4個含まれていた故障回路の割合をそれぞれ示している。

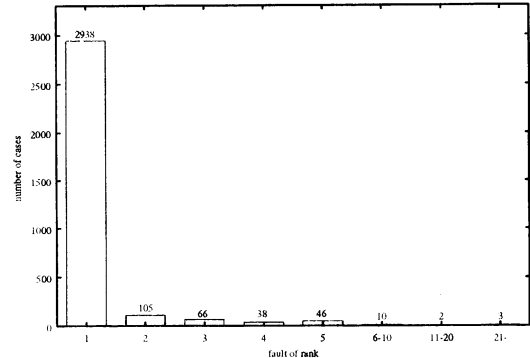


図3 First Hit の分布

5. むすび

本稿では、BIST環境に適応した多重縮退故障の診断法として、不確かなテスト集合による故障診断法を提案した。提案した故障診断法は、1) 検出テストの検出故障数の違いに着目した故障候補の推定法、2) 非検出テストにおける検出回数 の閾値を導入した故障候補数の削減法、および、3) 故障候補に対する評価に従った故障候補の順位付けからなる。

提案した多重縮退故障に対する故障診断法を2重縮退故障から4重縮退故障までを挿入したベンチマーク回路に適用して評価実験を行った。評価実験結果から、故障の多重度に関わらず99%の故障回路に対して、存在する故障の少なくとも一つは、20個以内の故障候補に推定されていることが示された。

提案した故障診断法は、不確かなテスト集合によって故障箇所を推定でき、また、誤りを観測する外部出力およびフリップフロップの位置を知ることなく故障箇所を推定できる。したがって、提案した故障診断法を適用することによって、大規模回路の故障診断において問題となるテスト時間およびテスト装置に必要な記憶容量の増大を抑えることができると考える。

謝辞：

本研究は一部、(株)半導体理工学研究中心(STARC)との共同研究。および、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)(課題番号15500043)の研究助成による。

文 献

- [1] J. G-Dastidar, D. Das, and N. A. Touba, "Fault diagnosis in scan-based bist using both time and space information," in *Proc. Int. Test Conf.*, 1999, pp. 95-102.
- [2] D. B. Lavo, I. Hartanto, and T. Larrabee, "Multiplets, models, and the search for meaning improving per-test fault diagnosis," in *Proc. Int. Test Conf.*, 2002, pp. 250-259.
- [3] C. Liu and K. Chakrabarty, "Failing vector identification

表 2 多重縮退故障に対する故障診断結果

回路名	2 重縮退故障			3 重縮退故障				4 重縮退故障				
	suc. ratio	hit1	hit2	suc. ratio	hit1	hit2	hit3	suc. ratio	hit1	hit2	hit3	hit4
c432	100	10.0	90.0	100	2.0	24.0	74.0	100	0.0	10.0	30.0	60.0
c499	100	4.7	95.3	100	2.0	20.0	78.0	100	0.0	2.4	33.3	64.3
c880	100	7.0	93.0	100	0.0	20.0	80.0	100	0.0	6.0	38.0	56.0
c1355	100	3.0	97.0	100	0.0	12.0	88.0	100	0.0	2.0	28.0	70.0
c1908	99.0	42.0	57.0	98.0	32.0	44.0	22.0	90.0	24.0	36.0	24.0	6.0
c2670	99.0	4.0	95.0	100	2.0	18.0	80.0	100	0.0	4.0	32.0	64.0
c3540	100	16.0	84.0	100	6.0	50.0	44.0	100	2.0	14.0	48.0	36.0
c5315	100	6.0	94.0	100	4.0	20.0	76.0	100	0.0	8.0	38.0	54.0
c6288	100	4.0	96.0	100	0.0	16.0	84.0	100	0.0	4.0	32.0	64.0
c7552	100	5.0	95.0	100	2.0	12.0	86.0	100	4.0	4.0	28.0	64.0
cs27	100	0.0	100	100	0.0	100	0.0	100	0.0	0.0	100	0.0
cs208	100	24.5	75.5	100	6.1	48.5	45.5	100	0.0	20.8	54.2	25.0
cs298	100	8.1	91.9	100	0.0	22.4	77.6	100	0.0	2.7	35.1	62.2
cs344	100	7.1	92.9	100	2.7	21.6	75.7	100	0.0	14.3	28.6	57.1
cs349	98.2	10.5	87.7	100	5.3	21.1	73.7	100	0.0	10.7	42.9	46.4
cs382	100	7.9	92.1	100	0.0	26.0	74.0	100	0.0	9.1	38.6	52.3
cs420	100	19.6	80.4	100	8.0	38.0	54.0	100	4.2	16.7	41.7	37.5
cs444	100	4.0	96.0	100	2.0	16.0	82.0	100	0.0	8.0	36.0	56.0
cs510	100	10.0	90.0	100	0.0	20.0	80.0	100	0.0	8.0	42.0	50.0
cs526	100	11.0	89.0	100	0.0	30.0	70.0	100	2.0	8.0	30.0	60.0
cs820	100	21.0	79.0	100	6.0	40.0	54.0	100	2.0	24.0	34.0	40.0
cs832	100	17.0	83.0	100	2.0	32.0	66.0	100	2.0	14.0	52.0	32.0
cs838	100	26.0	74.0	100	10.0	52.0	38.0	100	14.0	38.0	30.0	18.0
cs953	100	37.0	63.0	100	16.0	54.0	30.0	100	14.0	36.0	38.0	12.0
cs1196	100	17.0	83.0	100	2.0	38.0	60.0	100	2.0	16.0	36.0	46.0
cs1238	100	18.0	82.0	100	4.0	26.0	70.0	100	0.0	20.0	34.0	46.0
cs1423	100	13.0	87.0	100	2.0	24.0	74.0	100	2.0	10.0	40.0	48.0
cs1488	100	7.0	93.0	100	2.0	22.0	76.0	100	0.0	4.0	50.0	46.0
cs5378	100	24.0	76.0	100	8.0	40.0	52.0	100	0.0	32.0	36.0	32.0
cs9234	97.0	19.0	78.0	100	6.0	26.0	68.0	100	2.0	18.0	40.0	40.0
cs13207	96.0	20.0	76.0	98.0	6.0	44.0	48.0	94.0	4.0	18.0	48.0	24.0
cs15850	99.0	16.0	83.0	100	4.0	22.0	74.0	100	2.0	8.0	34.0	56.0
cs35932	100	30.0	70.0	100	14.0	54.0	32.0	100	10.0	32.0	52.0	6.0
cs38417	100	25.0	75.0	100	2.0	42.0	56.0	100	2.0	22.0	48.0	28.0
cs38584	100	24.0	76.0	100	8.0	68.0	24.0	100	14.0	48.0	30.0	8.0
average	99.7	14.8	84.9	99.9	4.7	33.2	61.9	99.5	3.0	15.1	39.5	41.9

based on overlapping intervals of test vectors in a scan-BIST environment," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design*, vol. 22(5), pp.593-604, 2003.

- [4] H. Takahashi, K. O. Boateng, K. K. Saluja, and Y. Takamatsu, "On diagnosing multiple stuck-at faults using multiple and single fault simulation in combinational circuits," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design*, vol. 21(3), pp. 362-368, Mar. 2002.
- [5] H. Takahashi, Y. Tsugaoka, H. Ayano, and Y. Takamatsu, "BIST based diagnosis using ambiguous test set," in *Proc. DFT*, pp.89-96, 2003.
- [6] H. Takahashi, Y. Yamamoto, Y. Higami, and Y. Takamatsu, "Enhancing BIST based single/multiple stuck-at fault diagnosis by ambiguous test set," in *Proc. ATS*, 2004.
- [7] Z. Wang, K. H. Tsai, M. Marek-Sadowska, and J. Rajski, "An efficient and effective methodology on the multiple fault diagnosis," in *Proc. Int. Test Conf.*, 2003, pp. 329-338.
- [8] T. Vogels, W. Maly, and R.D. Blanton, "Progressive bridge

identification" in *Proc. Int. Test Conf.*, 2003, pp. 309-318.

- [9] J. Rajski and J. Tyszer, "Diagnosis of scan cells in BIST environment," *IEEE Trans. on Computer-Aided Design*, vol. 48, no. 7, pp.724-731, 1999.
- [10] J. Savir and W. H. McAnney, "Identification of failing tests with cycling registers," in *Proc. Int. Test Conf.*, pp.322-328, 1988.
- [11] 三好勲元, 温暁青, 梶原誠司, "X故障モデルを用いた Per-Test 故障診断手法に関する研究," *DA シンポジウム*, 2004.
- [12] 重田一樹, 石山敏夫, "経路追跡型故障診断手法の実デバイスへの適用," *LSI テスティングシンポジウム*, pp.95-100, 2002.