

LSIテスト技術の基礎と動向

- LSIテスト技術の基礎
- VTS(VLSI Test Symposium) 2021報告

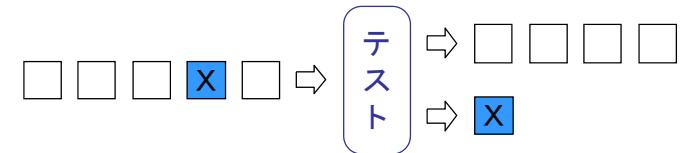
畠山一実

2021.06.29 Kazumi Hatayama

1

LSIのテストとは

LSIのテストとは製造されたチップに含まれる不良品を選別する作業



X : 不良品

2021.06.29 Kazumi Hatayama

3

アウトライン

- ◆はじめに
- ◇LSIテスト技術の基礎
 - 論理回路テスト生成手法
 - テスト容易化設計
- ◇VTS2021報告

2021.06.29 Kazumi Hatayama

2

テスト装置: テスタ



高性能SoCテスタ



低価格テスタ

SoC:System-on-a-Chip

2021.06.29 Kazumi Hatayama

4

LSIテストの課題

LSIの高集積化に伴って以下の課題が重大化

- ・テストコスト
- ・テスト品質

2021.06.29 Kazumi Hatayama

5

テストコストとその要因

全体テストコストには様々な要因が係わり
何が重要かは場合によって異なる

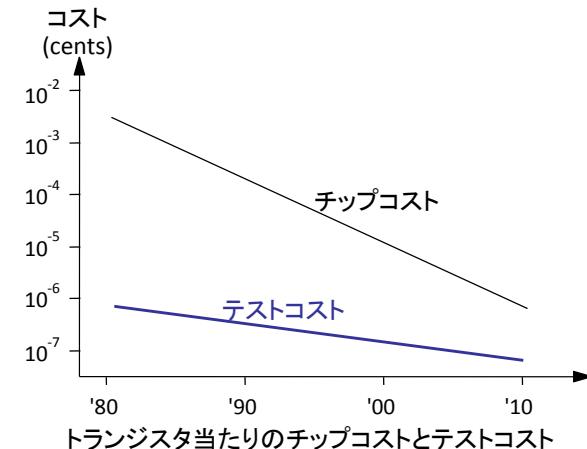
- ・**テスト設計コスト**
計算機処理時間, 人手作業工数, ツール費用
- ・**テスト回路のコスト**
エリアオーバヘッド, 配線オーバヘッド
- ・**テスタコスト**
テスタ使用時間, テスタ性能向上
- ・**不良品のペナルティ**
補償, 信用失墜, 不良解析工数

2021.06.29 Kazumi Hatayama

7

テスト・クライシス

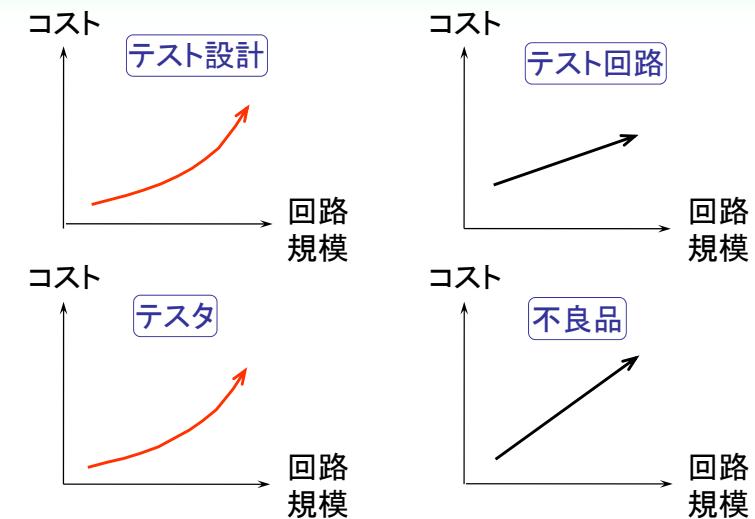
LSIの大規模・高集積化とともにテストコストが爆発



2021.06.29 Kazumi Hatayama

6

テストコストと回路規模の関係



2021.06.29 Kazumi Hatayama

8

テスト品質の重要性

テスト品質は製品の不良レベルに直接かかわる

$$DL = 1 - Y^{(1-T)}$$

DL: 不良レベル

良品と判定されたLSI中の不良品の割合

Y: 歩留り

製造LSI中の良品の割合

T: テスト品質

不良品を選別できる確率

2021.06.29 Kazumi Hatayama

9

アウトライン

◇はじめに

◆LSIテスト技術の基礎

－論理回路テスト生成手法

－テスト容易化設計

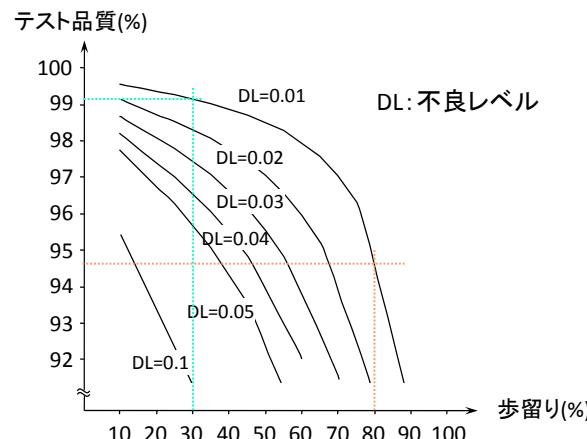
◇VTS2021報告

2021.06.29 Kazumi Hatayama

11

テスト品質と不良レベルの関係

歩留りが下がると高いテスト品質が必要になる



2021.06.29 Kazumi Hatayama

10

論理回路テスト生成手法

1. 論理回路のテストとは

2. 故障モデルとテスト方法

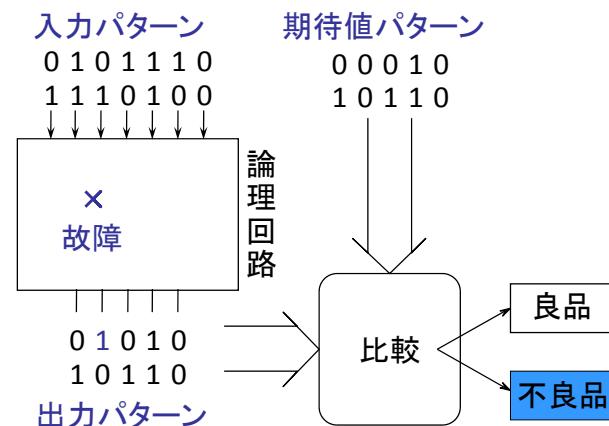
3. テスト生成基本アルゴリズム

2021.06.29 Kazumi Hatayama

12

論理回路のテストの仕組み

出力パターンと期待値パターンを比較して良否を判定

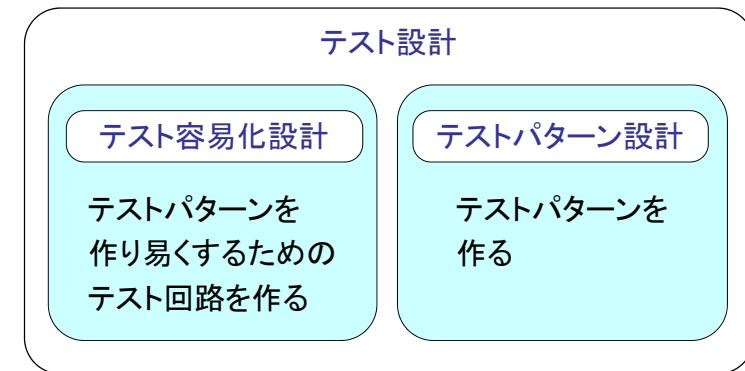


2021.06.29 Kazumi Hatayama

13

広い意味でのテスト設計

テスト設計は広義には2つの内容を含む

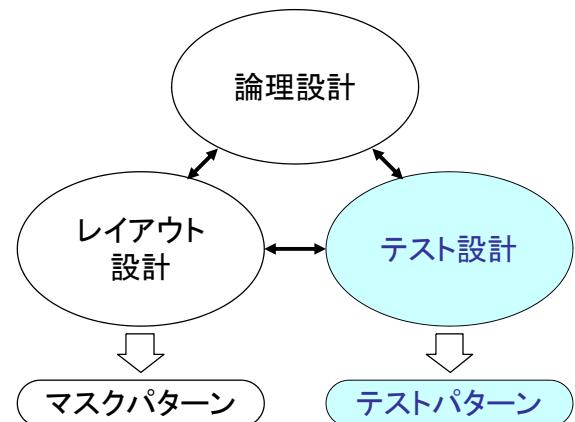


2021.06.29 Kazumi Hatayama

15

テスト設計の位置づけ

テスト設計とはテストのための入力パターンの設計



2021.06.29 Kazumi Hatayama

14

テスト品質の良し悪し

テスト品質の良し悪しはテストパターンの良し悪しによる

テストパターンの良し悪し	テストの結果
良くない	<p>TEST</p>
良い	<p>TEST</p>

2021.06.29 Kazumi Hatayama

16

良いテストパターンを作るには

良いテストパターンを作るには様々な工夫が必要

・テスト生成手法の改良

- ・故障検出能力の向上
- ・故障モデルの拡張
- ・テストパターン数の削減

・テスト容易化設計の活用

- ・テスト生成時間の短縮
- ・テスト実行時間の短縮
- ・テストパターン品質の向上

2021.06.29 Kazumi Hatayama

17

論理回路テスト生成手法

1. 論理回路のテストとは

2. 故障モデルとテスト方法

3. テスト生成基本アルゴリズム

2021.06.29 Kazumi Hatayama

18

故障モデルの分類

テスト設計を考える際には**故障のモデル化**が必要

◎故障のタイプによる分類

- ・縮退故障(stuck-at) : 信号線が一定レベルに固定
- ・短絡故障(short/bridge) : 信号線が他の信号線と短絡
- ・開放故障(open) : 信号線が断線
- ・遅延故障(delay) : 信号伝播遅延が増大
[遷移故障(transition) : 遅延が大幅に増大]
- ・その他の故障:トランジスタ故障, メモリ故障, 機能故障, . . .

◎故障の数による分類

单一故障(single), 多重故障(multiple)

◎故障の状態による分類

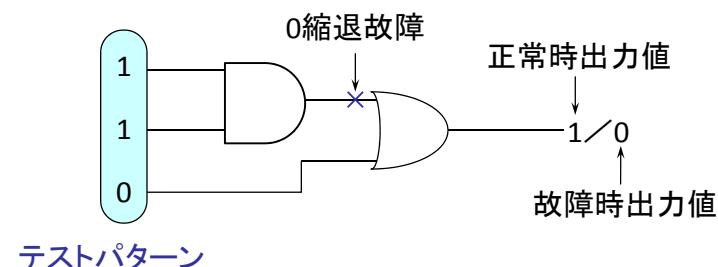
永久故障(permanent), 間欠故障(intermittent), 過渡故障(transient)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

19

縮退故障のテスト方法

縮退故障は**スタティックなパターン**でテスト可能



2021.06.29 Kazumi Hatayama

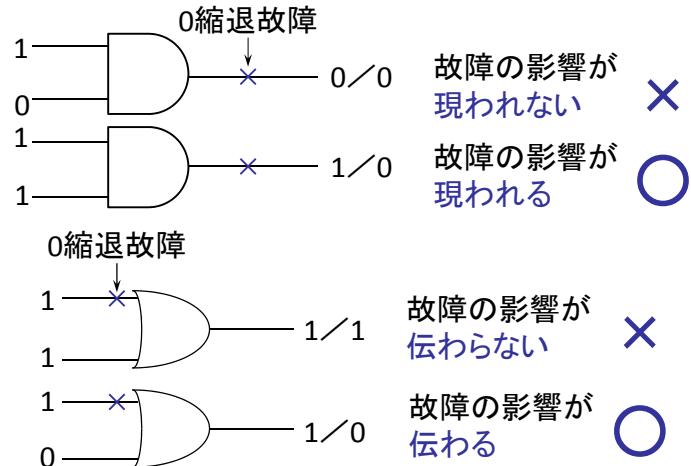
19

2021.06.29 Kazumi Hatayama

20

故障の顕現化と伝播

テストするためには故障の影響の顕現化と伝播が必要



2021.06.29 Kazumi Hatayama

21

単一縮退故障の仮定

以下では単一縮退故障を主体として話を進める

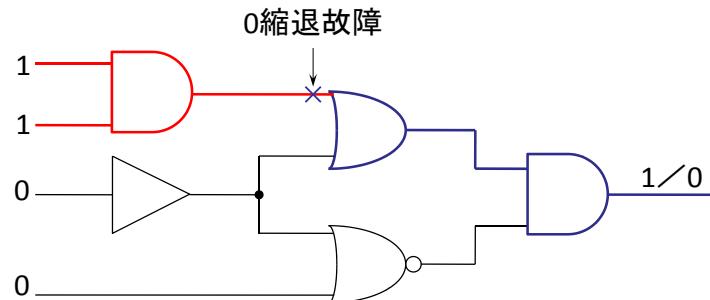
- ・単一縮退故障が最も取り扱いやすい
テストパターン作成方法が最もわかりやすい
- ・他の故障の多くは単一縮退故障のテストパターンで検出できる
○多重縮退故障についてはほとんどをカバー
○短絡故障についても大部分は検出可能
★ただし、最近ではカバーできない故障が重要になりつつある(遅延故障、開放故障等)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

23

縮退故障のテストの例

故障を顕現化させてそれを伝播する



2021.06.29 Kazumi Hatayama

22

故障検出率

テストパターン品質の尺度として故障検出率を用いる

故障検出率の定義

あるテストパターンTPに対してTPの故障検出率FCを次式で定義する

$$FC = N_{df} / N_{af}$$

ここで、
 N_{af} : モデル化された故障の総数
 N_{df} : モデル化された故障のうち、
TPで検出される故障の総数

2021.06.29 Kazumi Hatayama

24

論理回路テスト生成手法

1. 論理回路のテストとは
2. 故障モデルとテスト方法
3. テスト生成基本アルゴリズム

2021.06.29 Kazumi Hatayama

25

主なテスト生成アルゴリズム

組合せ回路用アルゴリズム

- ・一次元経路活性化法
- ・Dアルゴリズム
- ・PODEM法
- ・FANアルゴリズム
- ⋮

順序回路用アルゴリズム

- ・拡張Dアルゴリズム
- ⋮

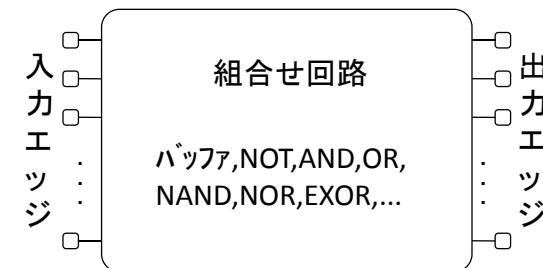
2021.06.29 Kazumi Hatayama

26

組合せ回路用アルゴリズム

組合せ回路モデルに対してテストパターンを生成

ある信号線に0(または1)縮退故障を仮定し,
これを検出するための入力パターンを求める



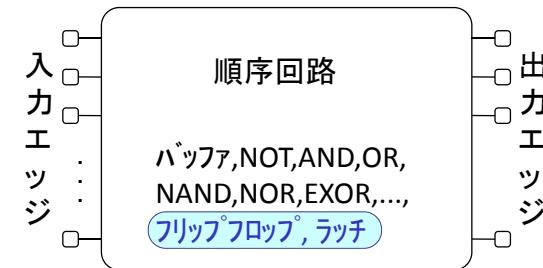
2021.06.29 Kazumi Hatayama

27

順序回路用アルゴリズム

順序回路モデルに対してテストパターンを生成

ある信号線に0(または1)縮退故障を仮定し,
これを検出するための入力パターン系列を求める



2021.06.29 Kazumi Hatayama

28

一次元経路活性化法

故障伝播経路を決めてその経路を活性化

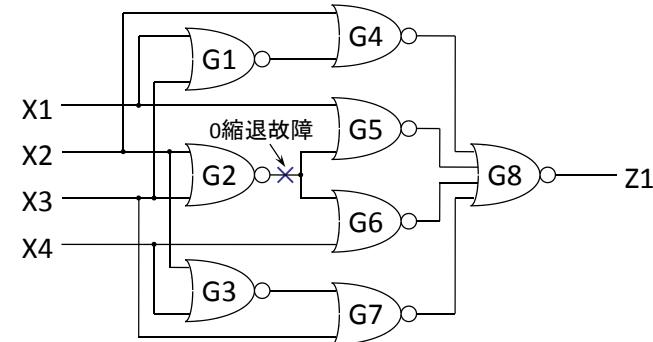
1. 故障点に故障の影響が現われる条件を求める
(故障顕現化条件)
2. 故障の影響を出力点まで伝播する経路を決める
(故障伝播経路)
3. 故障伝播経路を活性化する条件を求める
(経路活性化条件)
4. 以上の条件を満たす入力パターンを求める

2021.06.29 Kazumi Hatayama

29

一次元経路活性化法: 欠点

一次元の経路では故障伝播できない場合がある
(例: シュナイダーの回路)
→故障伝播経路の再収れんが必要



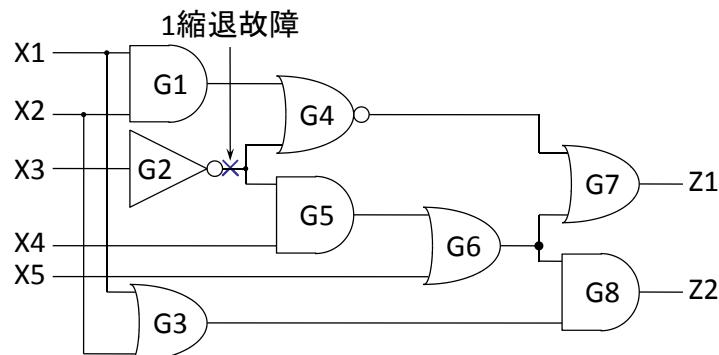
2021.06.29 Kazumi Hatayama

31

一次元経路活性化法: 生成例

・顕現化条件 : $G2=0$
・伝播経路 : $G2-G5-G6-G8$ \Rightarrow
・活性化条件 : $X4=1, X5=0, G3=1$

$X1=1, X2=0,$
 $X3=1, X4=1,$
 $X5=0$

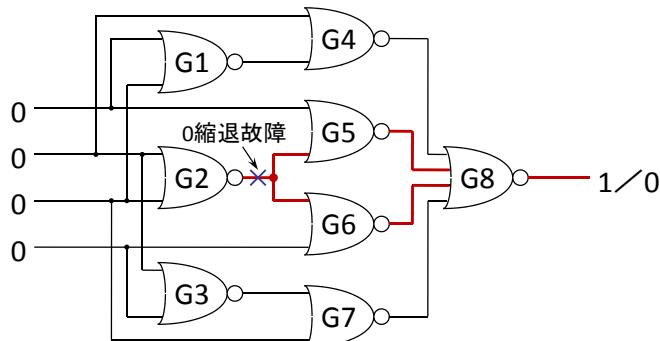


2021.06.29 Kazumi Hatayama

30

シュナイダーの回路のテスト

故障伝播経路の再収れんが必要



2021.06.29 Kazumi Hatayama

32

Dアルゴリズム(D-alg.)

キューブ演算によりテストパターンを求める

1. 故障挿入: 故障点に故障論理値D(または \bar{D})を与える

D…正常時1, 故障時0

\bar{D} …正常時0, 故障時1

基本Dキューブを用いる

2. 前方操作: 故障論理値を前方(出力側)に伝播する

伝播Dキューブを用いる

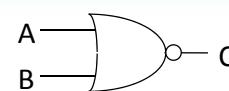
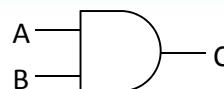
3. 後方操作: 論理素子の出力値から入力値を決める

基本キューブ(Cキューブ)を用いる

2021.06.29 Kazumi Hatayama

33

D-alg.で用いるキューブの例



A	B	C
0	X	0
X	0	0
1	1	1
0	X	D
X	0	D
1	1	D
1	D	D
D	1	D
D	D	D

基本キューブ

A	B	C
0	0	1
1	X	0
X	1	0
0	0	D
1	X	D
X	1	D
0	D	D
D	0	D
D	D	D

基本Dキューブ

A	B	C
0	D	D
D	0	D
D	D	D
D	D	D

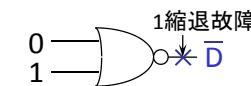
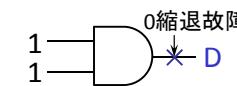
伝播Dキューブ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

34

キューブの使用方法

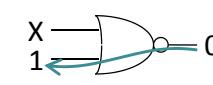
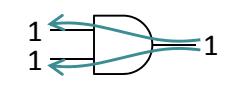
・故障挿入: 基本Dキューブ



・前方操作: 伝播Dキューブ



・後方操作: 基本キューブ



決定済 → 1 → 0

決定済 → D → 1
矛盾!

2021.06.29 Kazumi Hatayama

35

D-alg.: テスト生成例

シュナイダーの回路に対してもテストパターン生成可能

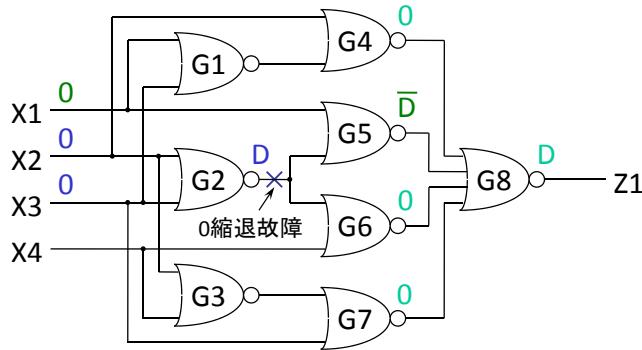
	X1	X2	X3	X4	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	
(1)	0	0				D							[G2]
(2)	0	0	0			D			\bar{D}				[G5]
(3)	0	0	0		D	0	\bar{D}	0	0	D			[G8]
(4)	0	0	0	1	D	0	\bar{D}	0	0	D			[G6]
(5)	0	0	0	1	D	1	0	\bar{D}	0	0	D		[G7] ×
(3')	0	0	0	0	D		\bar{D}	\bar{D}	D				[G6]
(4')	0	0	0	0	D	0	\bar{D}	\bar{D}	0	D			[G8]
(5')	0	0	0	0	D	1	0	\bar{D}	\bar{D}	0	D		[G7]
(6')	0	0	0	0	1	D	1	0	\bar{D}	\bar{D}	0	D	[G4] ○

2021.06.29 Kazumi Hatayama

36

D-alg.: テスト生成例(つづき1)

ステップ(1)～(3): 故障挿入 & 前方操作

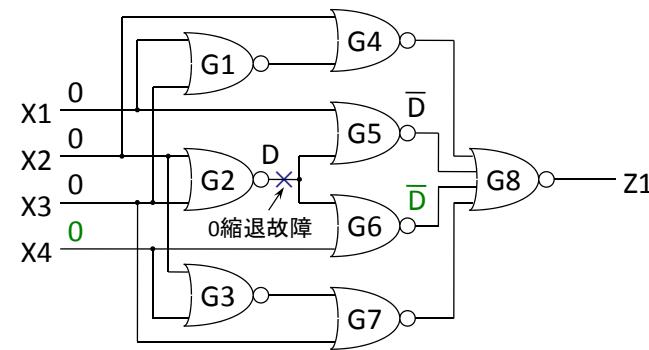


2021.06.29 Kazumi Hatayama

37

D-alg.: テスト生成例(つづき3)

ステップ(3'): 前方操作(対象変更: G8→G6)

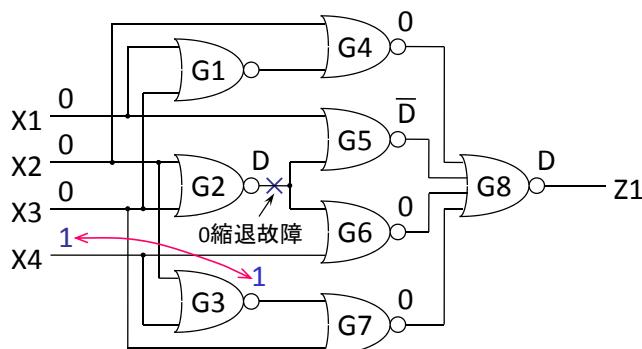


2021.06.29 Kazumi Hatayama

39

D-alg.: テスト生成例(つづき2)

ステップ(4)～(5): 後方操作→矛盾

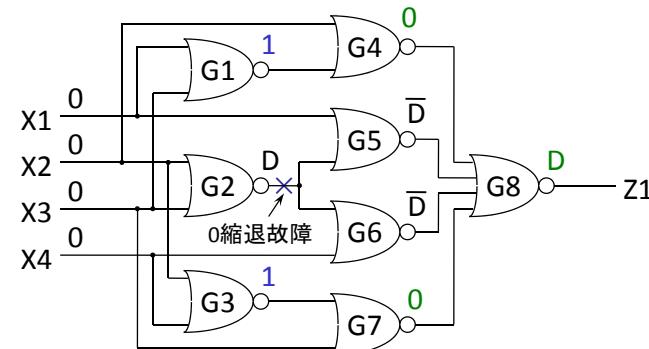


2021.06.29 Kazumi Hatayama

38

D-alg.: テスト生成例(つづき4)

ステップ(4')～(6'): 前方/後方操作→生成完了



2021.06.29 Kazumi Hatayama

40

アウトライン

◇はじめに

◆LSIテスト技術の基礎

－論理回路テスト生成手法

－テスト容易化設計

◇VTS2021報告

2021.06.29 Kazumi Hatayama

41

テスト容易化設計の必要性

大規模かつ高機能なLSIでは方策なしにテスト設計に取り組むことは不可能（テスト生成コストが莫大）

テスト容易化のアプローチ

・問題をより易しい問題に変換する

スキャン設計方式,

階層型テスト容易化方式

・テスト生成をできるだけしないようにする

組込み自己テスト方式,

万能テスト方式

2021.06.29 Kazumi Hatayama

43

テスト容易化設計

1. スキャン設計方式

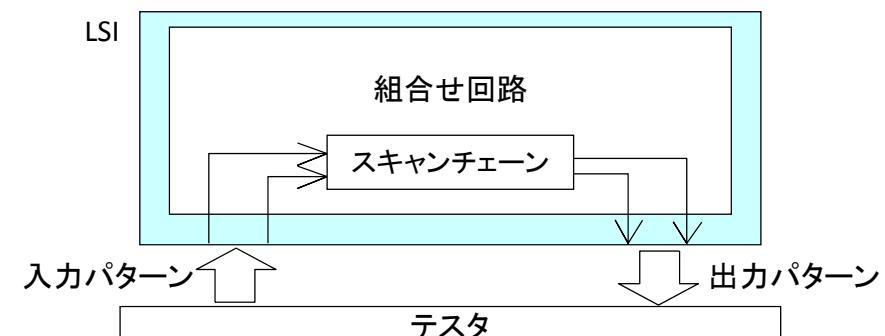
2. 組込み自己テスト方式

2021.06.29 Kazumi Hatayama

42

スキャン設計によるテスト容易化

スキャン設計ではテストからの入力パターンをスキャンチェーン（一般に複数）を通してフリップフロップ(FF)に書込むことにより内部状態を設定し、FFでの出力パターンをスキャンチェーンを通してテストに読出すことにより内部状態を観測する

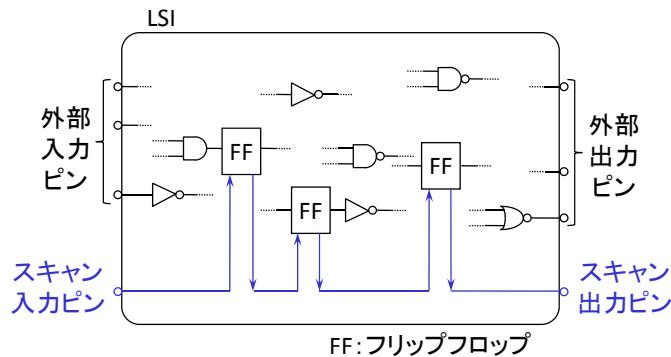


2021.06.29 Kazumi Hatayama

44

スキャンチェーンの構成例

FFを外部から直接制御観測できるようになる



2021.06.29 Kazumi Hatayama

45

スキャン方式の短所

種々のオーバーヘッドが短所

ゲートオーバーヘッド

方式によって異なるが一般に全体の5~10%程度がスキャンのための回路(フリップフロップ中も含む)

ディレイペナルティ

方式によって異なるが一般に5~10%程度はディレイが増加

スキャン専用ピン

方式によって異なるが一般に2~4本程度必要

2021.06.29 Kazumi Hatayama

47

スキャン方式の利点

順序回路のテスト生成の問題を組合せ回路の
テスト生成問題に簡約化できる

テストパターン生成の困難さの比較

回路種別	状態数	テストパターン作成工数	
		原理	アルゴリズム
組合せ回路	2^P	$K_1 \cdot 2^P$	$K_2 \cdot P^k$
順序回路	2^{P+F}	$K_1 \cdot 2^{P+F}$	$(K_2 \cdot P^k) \cdot 2^F$

P:入力ピン数, F:フリップフロップ数

K_1, K_2 :比例定数, k:係数(1~2)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

46

スキャン方式の課題

テスト時の動作が通常動作と異なる

テスト困難な部分がある

- 論理回路からメモリにアクセスする部分のテスト等複数クロックサイクルが必要なケース

過剰な電力を消費する

- 通常動作時は回路全体の20%程度しか動作しない場合でも、テスト時には50%以上動作することもある
- 低電力設計された回路でも、低電力機能を利用せず動作させる必要がある

2021.06.29 Kazumi Hatayama

48

テスト容易化設計

1. スキャン設計方式

2. 組込み自己テスト方式

2021.06.29 Kazumi Hatayama

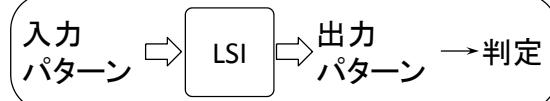
49

組込み自己テスト(BIST)方式

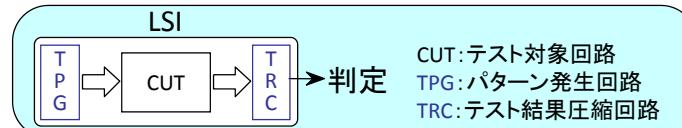
BISTはテストパターン印加を省略するための手段

(BIST : Built-In Self Test)

通常のテスト方法



BIST方式によるテスト方法



2021.06.29 Kazumi Hatayama

50

テスト対象によるBIST方式の分類

テスト対象ごとにBIST方式も異なる

・ロジックBIST

・主として疑似乱数(ランダム)パターンでテスト

・メモリBIST

・マーチング等のメモリテストパターンを発生

・アナログBIST

・回路ごとに工夫

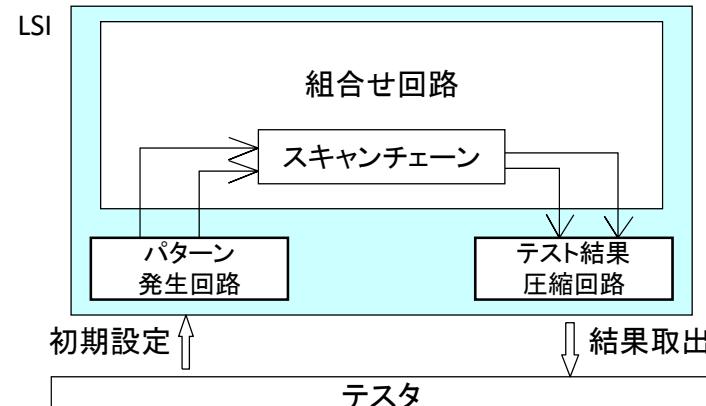
・一般的手法としてはD/A, A/D変換を利用

2021.06.29 Kazumi Hatayama

51

スキャンベースBIST方式

スキャンベースBIST方式はTPGの出力をスキャンチェーンに接続し
スキャンチェーンを通して内部状態を設定する方式



2021.06.29 Kazumi Hatayama

52

スキャンベースBISTの利点と欠点

BISTの利点

- ・テストのテストデータ量がきわめて少ない
- ・スキャンチェーン数が拡大可能
- ・少ピンでテストできる
- ・実動作のスピード(at-speed)でテストできる
- ・実動作時の保守用にも利用できる

BISTの欠点

- ・ゲートオーバーヘッドが大きい
- ・非常に高い故障検出率を得るのが難しい
- ・故障解析が難しい
- ・設計制約が厳しい(不定値伝播禁止)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

53

データミニスティックBIST

スキャンテストと同等のパターンをBISTで発生することによりテスト品質を向上

- ・ランダムBIST: ランダムパターンを発生(LFSR)
- ・データミニスティックBIST:
 - テスト生成で求めたテストパターンをBISTのランダムパターンに埋め込む
 - ・Reseeding
 - ・ビット反転
 - ・近傍パターン群発生

2021.06.29 Kazumi Hatayama

55

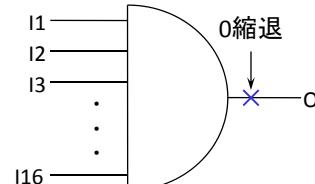
スキャンベースBIST方式の問題点

スキャンベースBISTでは故障検出率が低下

故障検出率の低下 : フルスキャン…99%以上
→スキャンベースBIST…80~95%

原因

- ・ランダムテスト不適故障の存在



対策

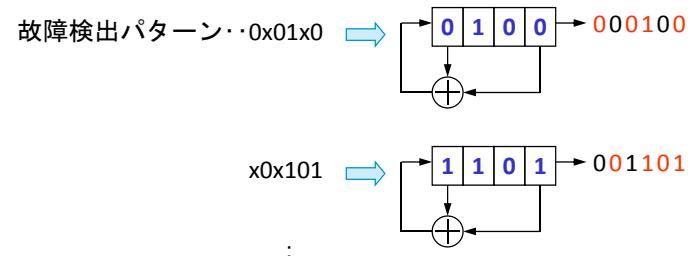
- ・重み付き乱数の利用 : 複数重みを切り替えて使用
- ・検査点の挿入…ランダムテスト容易性向上
- ・特定パターンの発生 : データミニスティックBIST

2021.06.29 Kazumi Hatayama

54

reseeding

- ・テスト生成で求めた故障検出パターンをLFSRから出力するための種パターン(seed)を求める
種パターンを替えながら乱数パターンを発生

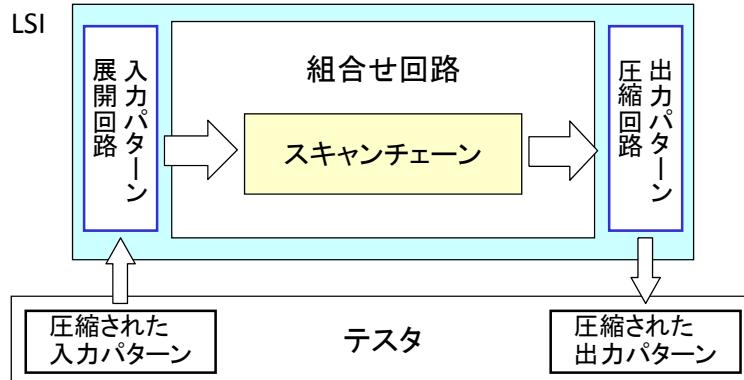


2021.06.29 Kazumi Hatayama

56

圧縮パターンテスト方式

- ・テスト入力パターンを圧縮してテスタから印加し、内部で展開してスキャンテストを実行。
テスト結果を内部で圧縮してテスタに取り出す。



2021.06.29 Kazumi Hatayama

57

アウトライン

- ◇はじめに
- ◇LSIテスト技術の基礎
 - －論理回路テスト生成手法
 - －テスト容易化設計
- ◆VTS2021報告

2021.06.29 Kazumi Hatayama

59

圧縮パターンテスト方式の利点と課題

- ・圧縮パターンテスト方式の利点
 - ・スキャン方式に比べてテストデータ量が大幅に減少
 - ・スキャンチェーン数が拡大可能
 - ・設計制約はスキャン方式と同等
 - ロジックBISTより不定値伝播の問題が小さい
- ・圧縮パターンテスト方式の課題
 - ・効率的な入力/出力パターンの圧縮
 - ・不定値の影響を受けない出力パターンの圧縮
 - ・at-speedでのテスト

2021.06.29 Kazumi Hatayama

58

VTS2021報告

- ・VTSについて
- ・VTS2021の概要
- ・論文発表の全体動向
- ・注目セッションの紹介
- ・まとめ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

60

VTS (VLSI Test Symposium)

・VTSの沿革および概要

- ・1983年にVLSI Test Workshopとしてスタート
- ・1991年からはSymposium
- ・LSIテスト分野ではITC (International Test Conference) に次ぐ
主要な国際会議
- ・ITCが企業主体であるのに対して、VTSはどちらかといえば
アカデミック
- ・2002年から企業事例のためのIP(Innovative Practice) Track
を設置し、企業からの参加者拡大に取組み中



2021.06.29 Kazumi Hatayama

61

VTS開催一覧

	Year	Date	Location
1st	1983	03/30-03/31	Atlantic City
2nd	1984	03/21-03/22	Atlantic City
3rd	1985	04/01-04/02	Atlantic City
4th	1986	03/18-03/19	Atlantic City
5th	1987	03/24-03/25	Atlantic City
6th	1988	03/22-03/23	Atlantic City
7th	1989	04/11-04/13	Atlantic City
8th	1990	04/10-04/11	Atlantic City
9th	1991	04/16-04/18	Atlantic City
10th	1992	04/07-04/09	Atlantic City
11th	1993	04/06-04/08	Atlantic City
12th	1994	04/25-04/28	Cherry Hill
13th	1995	04/30-05/03	Princeton
14th	1996	04/28-05/01	Princeton
15th	1997	04/27-04/30	Monterey
16th	1998	04/26-04/30	Monterey
17th	1999	04/25-04/29	Dana Point
18th	2000	04/30-05/04	Montreal
19th	2001	04/29-05/03	Los Angeles
20th	2002	04/28-05/02	Monterey
21st	2003	04/27-05/01	Napa

	Year	Date	Location
22nd	2004	04/25-04/29	Napa
23rd	2005	05/01-05/05	Palm Springs
24th	2006	04/30-05/04	Berkeley
25th	2007	05/06-05/10	Berkeley
26th	2008	04/27-05/01	San Diego
27th	2009	05/03-05/07	Santa Cruz
28th	2010	04/19-04/22	Santa Cruz
29th	2011	05/01-05/04	Dana Point
30th	2012	04/23-04/26	Maui
31st	2013	04/29-05/01	Berkeley
32nd	2014	04/14-04/16	Napa
33rd	2015	04/27-04/29	Napa
34th	2016	04/24-04/27	Las Vegas
35th	2017	04/09-04/12	Las Vegas
36th	2018	04/22-04/26	San Francisco
37th	2019	04/23-04/25	Monterey
38th	2020	04/27-10 Mo.	Virtual
39th	2021	04/25-04/28	Virtual

2003-2006: プログラム委員、2007-2018: 実行委員
2007-2010: IP Track 2011-2014: Special Sessions
2015-2016: Publicity (Vice Chair) 2017-2018: Asian Initiative

2021.06.29 Kazumi Hatayama

62

アウトライン

- ・ VTSについて
- ・ [VTS2021の概要](#)
- ・ 論文発表の全体動向
- ・ 注目セッションの紹介
- ・ まとめ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

63

VTS2021概要

- ・開催日 : 2021年4月26日(月)～28(水)
- ・開催場所 : Virtual (Zoom Online)
- ・参加者 : 約230名 (日本からは13名以上)
- ・基調講演 : 2件
- ・論文発表 : 9セッション27件・投稿論文80件(採択率=34%)
- ・企業発表 : 4セッション11件+パネル1件
- ・チュートリアル : なし
- ・特別セッション : 8件
- ・その他 : 学位論文コンテスト(予選)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

64

VTS2021 At-a-Glance

Plenary Session	
Keynote 1	S. Leef (DARPA): Algorithm to Architecture to RTL to GDSII: Incorporating Security into All Phases of SoC Design and Implementation Flow
Keynote 2	K. Arabi (Altazo): Edge Computing Trends, Design and Test Challenges

Regular Paper Sessions	
RP1	Security Meets Testing
RP2	Reliability Testing
RP3	Analog and Mixed Signal Testing
RP4	Architecture and Software Reliability and Test
RP5	Diagnosis and Root Cause Analysis
RP6	Emerging Technologies Test and Reliability
RP7	New Directions in Diagnosis, Calibration and Fault Modeling
RP8	System and Timing Fault Testing
RP9	Industrial Practices

2021.06.29 Kazumi Hatayama

65

VTS2020 At-a-Glance (cont.)

Special Sessions	
SS1	Machine Learning for Semiconductor Test and Reliability
SS2	Test for AI Chips: from DFT to On-line Testing
SS3	Physical Attacks through Chip Backside: Threats, Challenges, and Opportunities
SS4	Machine Learning in Test: A Survey of Analog, Digital, Memory, and RF Integrated Circuits
SS5	Reliability Analysis for AI/ML Hardware
SS6	CAD for Hardware Security - Automation is Key to Adoption of Solutions
SS7	Operating Systems under Test: An Overview of the Significance of the Operating System in the Resiliency of the Computing Continuum
SS8	Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) Computers: How They Work, How They Fail, How to Test Them?

Innovative Practice Sessions	
IP1	Enabling In-System Test for Automotive SoCs: Online Self-Check and Field Test Requirements and Considerations for Safety-Critical ICs
IP2	Changing the Economics and Implementation of Scan Testing
IP3	Emerging Challenges in Chiplet Testing
IP4	Design, Test and EDA Challenges in Achieving Automotive Quality on Nanoscale Designs
IP5	Panel: Temperature Testing for Automotive: Optional or a Necessity?

Students Activities	
DT1-DT3	TTTC's E. J. McCluskey Doctoral Thesis Presentations

2021.06.29 Kazumi Hatayama

66

基調講演1

- S. Leef (DARPA): SoCの設計・実装フロー全般へのセキュリティの実装の連携
—アルゴリズム→アーキテクチャ→RTL→GDSII
- DARPAでのセキュリティ対応設計・実装メソドロジ: 3つのプログラム
 - ・動作設計(SHINE), 機能設計(AISS), 実装設計(SPIRAL)
- セキュリティ考慮高位合成: 脆弱性レポートを出力
 - ・脆弱性DB: 対象資産, 脆弱性&分類, 脅威の種類, 潜在シナリオ, 検証方法
- セキュアSoC自動実装: セキュリティと経済性を最適化
 - ・重点領域: サードパーティ攻撃, リバースエンジニアリング, サプライチェーン, 悪意のあるHW
 - ・システム合成&最適化: 電力とセキュリティの迅速な推定が重要
 - ・セキュアなレイアウトの実現: セキュリティの必要な資産の特定と保護
 - ・課題: 確実な特定, PPA(性能, 電力, 面積)への影響の最小化
 - ・戦略: レイアウト脆弱性DB, 脆弱性検出&対策手法, セキュリティ定量化, ...
 - ・参照モデル: 検出(アクセス性評価), 対策(アクセス性低減), 最適化(影響最小化)
- 結論
 - ・セキュリティの考慮はチップの設計&実装のプロセス全般を通して取り組むべき

2021.06.29 Kazumi Hatayama

67

基調講演2

- K. Arabi (Altazo): エッジコンピューティング・トレンド, 設計とテストの課題
- HWの時代が再び到来: HWアクセラレータ(GPU, NPU, ...)→量子コンピュータ
- コンピュータの経済学
 - ・データ(新たな油)→計算パワー(生産性)→ブロードバンド(インフラ)→通貨
- コンピュータアーキテクチャ: 初期はチューリングマシン, ノイマン, ハーバード
- 命令セットの進化: CISC→RISC→VLIW→ML/AI(命令なし)
- 構成の進化: マルチコア→GPU&DSP→専用アクセラレータ
- 計算の進化: メインフレーム→PC→クラウド(BB)→モバイル(3G)→エッジ(4G/5G)
 - ・5G: エッジコンピューティングを中心としたコネクティビティ・信頼性が1つのキー
- エッジコンピューティング: 実時間データで動作(クラウドはビッグデータで動作)
- 牽引役: 低電力, プライバシー, レイテンシ, データの過負荷
- 分野: モバイル, 5G NW, 自動運転, スマートシティー, インダストリ4.0, 極限エッジ
 - ・極限エッジ: 何兆個もの計算要素が小さな電池駆動デバイスに
 - ・クラス最高の電力性能比: LSTM, GRNN, DNN, DS-CNNなどにも対応
- エッジコンピューティングのテスト
 - ・テストはエッジコンピューティングのキーの1つ: 重要な観点は分野ごとに相違
 - ・強靭性, 極端な温度, ゼロ欠陥(自動運転), システムでのテスト(5G NW, 自動運転)

2021.06.29 Kazumi Hatayama

68

アウトライン

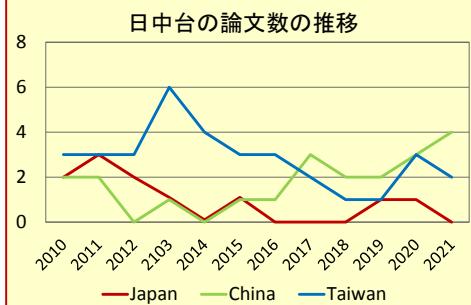
- VTSについて
- VTS2021の概要
- 論文発表の全体動向
- 注目セッションの紹介
- まとめ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

69

論文発表数:国別

- 採択論文数: 27件 (採択率は不明)
- 日本からは0件(3年ぶり)
- 国別採択論文数は右図のとおり
- 米国が半数未満に減少 (2010年以降では初めて)
- アジア(中国)と欧州(ドイツ)が健闘



2021.06.29 Kazumi Hatayama

70

論文発表数:分野別

- 前回(VTS2020)及び前々回(VTS2019)との比較

トピック別論文数	採択率	VTS2021	VTS2020	VTS2019
		34% (27/80)	34% (31/91)	33% (35/107)
ディレイ/性能テスト	1 / 0.3	2 / 0.7	2 / 0.7	0.7
電力考慮テスト	0 / 0.0	0 / 0.0	1 / 0.3	0.3
ATPG/DFT	0 / 0.0	4 / 1.3	5 / 1.8	1.8
メモリテスト	2 / 0.7	1 / 0.3	1 / 0.3	0.3
アナログ/MSテスト	4 / 1.3	2 / 0.7	1 / 0.3	0.3
高速I/O/RFテスト	0 / 0.0	0 / 0.0	2 / 0.7	0.7
3D-ICテスト	1 / 0.3	1 / 0.3	3 / 1.0	1.0
その他のデバイステスト	2 / 0.7	2 / 0.7	3 / 1.0	1.0
デバッグ/故障診断/歩留改善	4 / 1.3	5 / 1.7	6 / 2.0	2.0
システム高信頼化/劣化対応	7 / 2.3	7 / 2.0	4 / 1.5	1.5
セキュリティ	3 / 1.0	9 / 3.0	9 / 3.0	3.0
その他	3 / 1.0	1 / 0.3	1 / 0.3	0.3
合計	27 / 9.0	34 / 11.0	38 / 13.0	

VTS2019/VTS2020の分野別にはCTCからの優秀論文を各3件を含む

2021.06.29 Kazumi Hatayama

71

分野別の状況

- 分野別の状況
- 全体構成: やや変動あり
- ATPG/DFT関連: 大幅に減少
- AMS/RF関連: やや復調
- メモリテスト: 依然として低迷
- 3D-ICテスト: 変動中
- セキュリティ関連: 大幅に減少
- AI応用関連: 引き続き **堅調**
- 高信頼化関連: こちらも引き続き **堅調**
- その他は検証関連

	VTS 2021	VTS 2020	VTS 2019	VTS 2018
USA	11	16	29	19
Japan	0	1	1	0
China	4	3	2	2
Taiwan	2	3	1	1
India	2	0	0	0
Other Asia	0	2	0	0
France	0	0	1	1
Germany	4	3	0	2
Netherland	1	0	1	0
Belgium	0	1	0	0
Greece	0	0	0	0
Austria	0	0	0	2
Italy	2	2	0	1
Poland	0	0	0	0
Canada	1	0	0	2
Total	27	31	35	30

2021.06.29 Kazumi Hatayama

72

アウトライン

- VTSについて
- VTS2021の概要
- 論文発表の全体動向
- 注目セッションの紹介
- まとめ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

73

ATPG/DFT関連

- RP8: System and Timing Fault Testing
- IP2: Changing the Economics and Implementation of Scan Testing
- SS2: Test for AI Chips: from DFT to On-line Testing
- ATPG/DFT関連では一般1件、企業セッション3件、特別セッション2件の講演あり
- RP8.3, IP2.2及びSS2.1について紹介

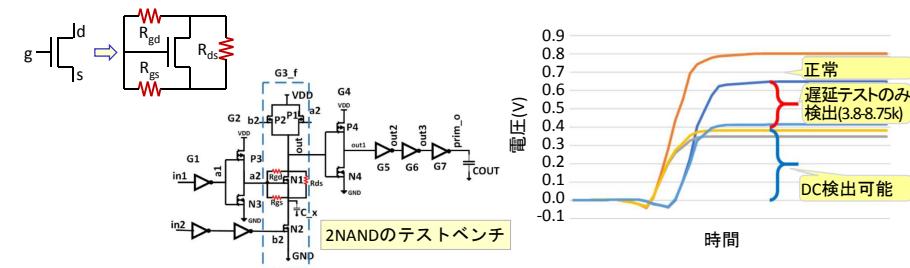
講演No.	タイトル	著者	所属
RP8.3	Two Pattern Timing Tests Capturing Defect-Induced Multi-Gate Delay Impact of Shorts	S. Pandey, Z. Liao, S. Nandi, A. Sinha, Georgia Tech., S. Natarajan, A. Singh, A. Chatterjee	Intel, Auburn U.
IP2.1	The Packetized Future: The Transition from Pin-Muxed to Bus-based Scan Data Distribution	G. Eide, J.F. Cote	Siemens EDA
IP2.2	Solving Test Challenges in Adopting High Protocol Scan for Production	J. Aki, D. Dohmann	Teradyne
IP2.3	Catching up with the SerDes – How Test is Moving from GPIO to High Speed Serial Interfaces	A. Nagarandal, R. Fish	Synopsys
SS2.1	Test AI Chips with Many Cores	Y. Huang	HiSilicon
SS2.3	ATPG Methodology for Industrial AI SOC Chips	G. Guo	Enflame

2021.06.29 Kazumi Hatayama

74

講演の概要: RP8.3

- S. Pandey (Georgia Tech.): 短絡欠陥起因の複数ゲート遅延に対応する2パターンテスト
- 歩留り向上: 微細化による予期せぬ欠陥により困難化
- テスト品質向上が重要
- 一部の抵抗性短絡欠陥はDCテストでは検出不可→2パターンテストが必要
- 特定のパターンに対してパス遅延が通常より50~80倍になる場合あり
- 入出力に接続するゲートの遅延に影響するため
- 提案手法: セル内の短絡(中間の抵抗値)に対するマルチパターンテスト手法
- 故障モデル: ソース, ドレイン, ゲートのそれぞれの間の抵抗性短絡
- クリティカルパスの遅延テストで大きな遅延を発生させる故障を優先的に選択
- クリティカルな抵抗値($R_{critical}$)の探索には2分探索法の変形を使用

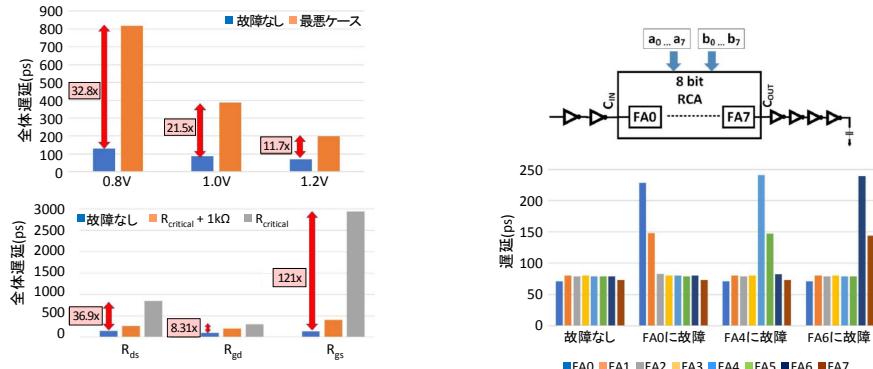


2021.06.29 Kazumi Hatayama

75

講演の概要: RP8.3 (cont.)

- 評価実験: 標準セル(2NANDほか), 柄上げ加算器を使用
- 欠陥のVddに対する感度: Vddが低いほど遅延増が大(0.8Vで30倍以上)
- 欠陥の位置に対する感度: ゲート-ソース間が最大($R_{critical}$ で120倍以上)
- 8ビット柄上げ加算器(全加算器(FA)8段で構成)での遅延増:
- 2段先のFAまで遅延増あり, 3段先以降は影響なし



2021.06.29 Kazumi Hatayama

76

講演の概要:IP2.2

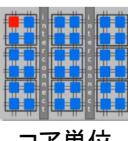
- J. Aki (Teradyne): 高プロトコルスキャンの生産適用におけるテスト課題を解決
 - ・高速シリアルI/Fを利用したスキャン: テスト時間&スキャンピンの対策として注目
 - ・テスト装置(ATE)における課題: シグナルインテグリティ(SI), ドライバソフトの品質
 - ・講演内容: これらの課題に対する解決策を提示
 - ・SIの事例: USB3.2 Gen2x1・BER(ビットエラー率)の増加によりテスト時間が増大
 - ・通常のUSBシステム: 全体で23dBの損失が発生
 - ・US ATEシステム: DIB(デバイスI/F基板)の工夫により信号減衰&ジッタを解決
 - ・ベンチ評価基板からATEへの移行: 様々な変換が必要
 - ・ブート時間の低減, ブートプロセスの簡略化してテストに最適化
 - ・データパケットの利用効率向上: パケットの使用方法を工夫して最適化
 - ・テストのワクワクする未来
 - ・どのプロトコルを使用するかには様々な選択肢あり
 - ・個別の課題もあれば共通の課題もあり
 - ・改善と最適化に多くのチャンスあり

2021.06.29 Kazumi Hatayama

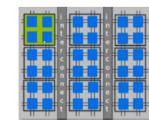
77

講演の概要:SS2.1

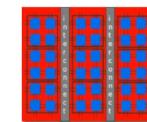
- Y. Huang (HiSilicon): メニーコアAIチップのテスト
 - ・AIアクセラレータ: AI用途の計算パワーのエンジンとして人気上昇中
 - ・様々なアーキテクチャ・十分な理解が設計&テストの観点から非常に重要
 - ・講演内容: DFTの観点から種々のAIチップに共通するポイントを整理
 - ・DFT実装(ATPG実行)形態: コア単位, スーパーコア単位, チップ一括を比較
 - (スーパーコア: 複数のコアを1つにまとめたブロック)
 - ・コア単位: 面積増, テスト時間, テストモードなどに問題
 - ・チップ一括: ATPG実行時間/メモリ, 消費電力などに問題
 - ・スーパーコア単位: 様々な点でSweet Spotとなりうる
 - ・複数コアのテスト: 同一パターンの同時供給(Broadcast)も可能・電力は要注意
 - ・コアレベルDFT: 圧縮回路, BIST回路など・許容レベルの面積
 - ・複数コアレベルDFT: パターン発生回路, ブロードキャストスキャンチェーンなど
 - ・スキャンピンをスーパーコア間で共有するなどの工夫も可能



コア単位



スーパーコア単位



チップ一括

2021.06.29 Kazumi Hatayama

78

AMS/RFテスト関連

- RP3: Analog and Mixed Signal Testing
- RP7: New Directions in Diagnosis, Calibration and Fault Modeling
- AMS/RFテスト関連では一般4件の講演あり
- RP3.1及びRP7.2について紹介

講演No.	タイトル	著者	所属
RP3.1	Automated Observability Analysis for Mixed-Signal Circuits	S. Sunter, K. Jurga	Siemens EDA, Poznan U.
RP3.2	Design for Testability of Low Dropout Regulators	W. Eisenstadt, A. Tulsiram	U. Florida
RP3.3	Maintaining NIST-Traceability for MEMS Sensors via In-Field Electrical Recalibration	I. Bassi, S. Ozev, D. Chang	Arizona S. U., Alphacore
RP7.2	Trim Time Reduction in Analog/RF ICs Based on Inter-Trim Correlation	V. A. Niranjan, D. Neethirajan, C. Xanthopoulos, E. de la Rosa, C. Alleyne, S. Mier, Y. Makris	UT Dallas, Qualcomm

2021.06.29 Kazumi Hatayama

79

講演の概要:RP3.1

- S. Sunter (Siemens EDA): MS回路に対する観測性の自動解析
 - ・MS回路の欠陥Sim.: 適切な準備があれば実用時間で可能に・自動化が進展
 - ・高品質化のための次のステップ: 未検出欠陥の原因解析→検出可能化
 - ・提案手法: 未検出欠陥の観測性の自動解析手法
 - ・特定テスト入力に対する可観測性を解析・欠陥個所からの経路をフォロー
 - ・各未検出欠陥に対して短絡/開放欠陥による電圧変化の伝搬状況を確認
 - ・実験評価: ITC'17 AMSベンチマークの8ビットSAR ADCを使用
 - ・48の欠陥のうち17が未検出・短絡欠陥が3, 開放欠陥が14
 - ・17の未検出欠陥のうち9が活性化できず→より良いテスト入力が必要
 - ・活性化できた8のうち6が観測できず→より良い出力解析が必要
 - ・残りの2は影響を途中までしか伝搬できず→より良いDFTが必要



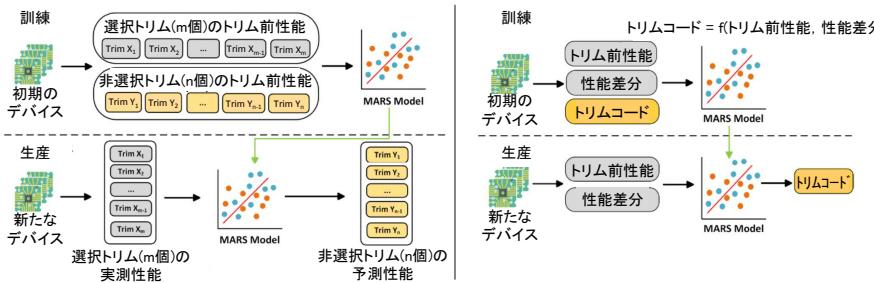
2021.06.29 Kazumi Hatayama

80

講演の概要: RP7.2

• V. A. Niranjan (UT-Dallas): トリム間相関に基づくアナログ/RF ICのトリム時間削減

- ・トリミング(製造後の性能較正): アナログ/RF ICの製造&テスト工程で重要
- ・チップごとに性能パラメータを個別に微調整・高歩留り&高性能を両立
- ・一般的な方法: デジタルトリムコードの選択と測定を繰り返して性能を最適化
→現在のアナログ/RF ICでは数100のトリム・多くの時間(コスト)が必要
- ・提案手法: 機械学習ベース手法によりトリム間相関を利用してトリム時間を削減
- ・トリムコードのモデル化: トリム前性能予測モデル, トリムコード予測モデル
- ・取得済のトリムデータから回帰モデルにより他の最適トリムコードを推定
- ・予測に用いるトリムの対象を遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて最適化

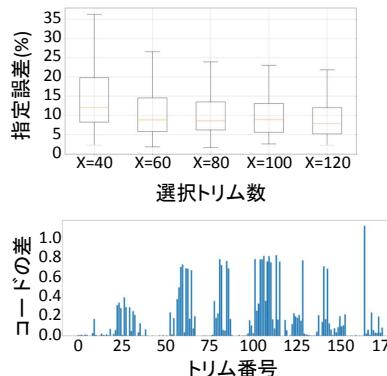


2021.06.29 Kazumi Hatayama

81

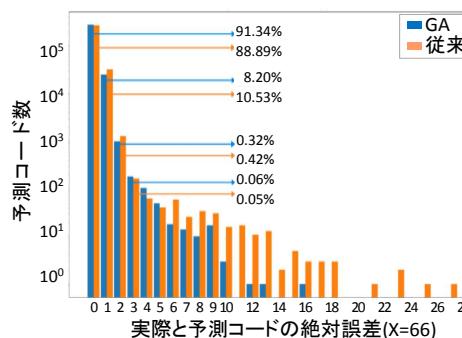
講演の概要: RP7.2 (cont.)

- ・実験評価: 先端プロセスのRFトランシーバIC(5712チップ)を使用
- ・トリム数(N)は173: すべてのトリム前性能及び最適トリムコードのデータあり
- ・トリム前性能の予測精度: 高い相関あり, 精度は選択トリム数(X)に従って向上
- ・トリムコードの予測精度: コードの差は非常に小さい(最大で1程度)
- ・遺伝的アルゴリズム(GA): 従来手法と比較して誤差を改善



2021.06.29 Kazumi Hatayama

82



AI応用関連

• RP5: Diagnosis and Root Cause Analysis

• RP7: New Directions in Diagnosis, Calibration and Fault Modeling

• SS1: Machine Learning for Semiconductor Test and Reliability

• SS4: Machine Learning in Test: A Survey of Analog, Digital, Memory, and RF IC

・AI応用関連では一般1件, 特別セッション5件の講演あり

・他にAIハードのテストと信頼性に関する2件の特別セッションあり

・RP7.1について紹介

講演No.	タイトル	著者	所属
RP5.3	Unsupervised Root-Cause Analysis with Transfer Learning for Integrated Systems	R. Pan, X. Li, K. Chakrabarty	Duke U.
RP7.1	Identifying Good-Dice-in-Bad-Neighborhoods Using Artificial Neural Networks	C.-H. Yang, C.-H. Yen, T.-R. Wang, C.-T. Chen, M. Chern, Y.-Y. Chen, J.-N. Lee, S.-Y. Kao, K.-C. Wu, M. Chao	NYMCTU, Realtek
SS1.1	Machine Learning for Semiconductor Reliability	H. Amrouch	U. Stuttgart
SS1.2	Explainability as a Frontier for Machine Learning in IC Test	B. Tan	New York U.
SS1.3	Physics-Informed Convolutional Neural Network for Electrostatics Analysis	W. Jin	UC Riverside
SS4.1	How Machine Intelligence can Solve Test Problems (and How it can't)	S. K. Millican	Auburn U.
SS4.2	What has been Done - Studies of Machine Intelligence in Test	S. Roy	Auburn U.

2021.06.29 Kazumi Hatayama

83

講演の概要: RP7.1

• C.-H. Yang (NYMCTU): ANNを用いたGDBN(悪い近傍の中の良品ダイ)の識別

・GDBN: 疑わしいダイを棄却して不良率を低減する効率的手法

・BNR(隣接の不良ダイの比率): 棄却判定の指標として有効(実験で確認済)

・提案手法: 新たなNNベースの拡張GDBN手法

・より広い範囲の近傍を用いて各ダイの疑惑レベル(SL)を正確に予測

・SLを指標とすることで十分に不良率を低減しつつ歩留り損失を最小化

・実験評価: 65nm製品(24ロット, 約3Mダイ), 7×7の近傍を使用, BNR利用と比較

・提案手法がBNR利用と比べて歩留り損失を効率的に低減できることを確認

SL利用	見逃し不良(元データ)	棄却した見逃し不良	歩留り損失(%)	不良率(DPPM)
SL > 1.0		0.00	0.000%	8.60
SL > 0.9		1.47	0.003%	8.09
SL > 0.8		2.17	0.007%	7.86
SL > 0.7		2.61	0.011%	7.70
SL > 0.6		3.01	0.018%	7.57
SL > 0.5		3.43	0.028%	7.42
SL > 0.4		3.87	0.044%	7.27
SL > 0.3		4.44	0.072%	7.08

BNR利用	見逃し不良(元データ)	棄却した見逃し不良	歩留り損失(%)	不良率(DPPM)
BNR > 100%		0.00	0.000%	8.60
BNR > 87.5%		0.62	0.001%	8.38
BNR > 75.0%	25.11	1.10	0.004%	8.22
BNR > 62.5%		1.39	0.009%	8.12
BNR > 50.0%		2.10	0.033%	7.88

2021.06.29 Kazumi Hatayama

84

アウトライン

- ・ VTSについて
- ・ VTS2021の概要
- ・ 論文発表の全体動向
- ・ 注目セッションの紹介
- ・ まとめ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

85

VTS2022は未定

- ・VTS2022については詳細は未定
- ・Webサイト(<http://www.ttc-vts.org>)で確認ください



2021.06.29 Kazumi Hatayama

87

VTS2021の特徴

- ・今回のVTS2021の特徴をまとめると以下のとおり。

(1) セキュリティ関連は論文数が減少

- ・論文数は大幅に減少したが、依然としてAI、車載と合わせて、3大トピックの一角
- ・セキュリティサポートツールの動きもあり

(2) AIチップのテストや高信頼化も話題に

- ・「AI for Test」だけでなく「Test for AI」への取り組みも活発化
- ・2件の特別セッションが設置された

(3) 中国のプレゼンスが引き続き高い

- ・国別論文数も5年連続で2位(同率を含む)を維持
- ・実行委員(OC)2名+プログラム委員(PC)1名
 - ・日本は小林先生(OC)のみ

2021.06.29 Kazumi Hatayama

86