

Eingebetteter Test zur hochgenauen Defekt-Lokalisierung

Abdullah Mumtaz, Michael E. Imhof, Stefan Holst, Hans-Joachim Wunderlich
Institut für Technische Informatik, Universität Stuttgart, D-70569 Stuttgart

Kurzfassung / Abstract

Moderne Diagnosealgorithmen können aus den vorhandenen Fehlerdaten direkt die defekte Schaltungsstruktur identifizieren, ohne sich auf spezialisierte Fehlermodelle zu beschränken. Solche Algorithmen benötigen jedoch Testmuster mit einer hohen Defekterfassung. Dies ist insbesondere im eingebetteten Test eine große Herausforderung.

Der Partielle Pseudo-Erschöpfende Test (P-PET) ist eine Methode, um die Defekterfassung im Vergleich zu einem Zufallstest oder einem deterministischen Test für das Haftfehlermodell zu erhöhen. Wird die im eingebetteten Test übliche Phase der vorgeschalteten Erzeugung von Pseudozufallsmustern durch die Erzeugung partieller pseudo-erschöpfender Muster ersetzt, kann bei vergleichbarem Hardware-Aufwand und gleicher Testzeit eine optimale Defekterfassung für den größten Schaltungsteil erreicht werden.

Diese Arbeit kombiniert zum ersten Mal P-PET mit einem fehlermodell-unabhängigen Diagnosealgorithmus und zeigt, dass sich beliebige Defekte im Mittel wesentlich präziser diagnostizieren lassen als mit Zufallsmustern oder einem deterministischen Test für Haftfehler.

Modern diagnosis algorithms are able to identify the defective circuit structure directly from existing fail data without being limited to any specialized fault models. Such algorithms however require test patterns with a high defect coverage, posing a major challenge particularly for embedded testing.

In mixed-mode embedded test, a large amount of pseudo-random patterns are applied prior to deterministic test pattern. Partial Pseudo-Exhaustive Testing (P-PET) replaces these pseudo-random patterns during embedded testing by partial pseudo-exhaustive patterns to test a large portion of a circuit fault-model independently. The overall defect coverage is optimized compared to random testing or deterministic tests using the stuck-at fault model while maintaining a comparable hardware overhead and the same test application time.

This work for the first time combines P-PET with a fault model independent diagnosis algorithm and shows that arbitrary defects can be diagnosed on average much more precisely than with standard embedded testing. The results are compared to random pattern testing and deterministic testing targeting stuck-at faults.

Schlüsselwörter / Keywords

Eingebetteter Selbsttest, Pseudoerschöpfender Test, Diagnose, Debug
BIST, Pseudo-Exhaustive Testing, Diagnosis, Debug

1 Einleitung

Latente Defekte sind eine der Hauptursachen für Zuverlässigkeitsprobleme bei Halbleitern. Diese Defekte zeichnen sich dadurch aus, dass sie erst im Betrieb des Halbleiters in Verbindung mit Alterung, Temperaturunterschieden oder Vibrationen akut werden und Fehler verursachen. Viele dieser Defekte könnten durch Änderungen im Design (wie z.B. Neudimensionierung von Transistoren und Verbindungsleitungen) vermieden werden. Allerdings muss dafür der Defekt erst einmal lokalisiert werden, was bei Test-Escapes und No-Trouble-Found-Fällen unmöglich ist. Mit Burn-in und Corner-Testing im Volumentest wird ein hoher Aufwand getrieben, um möglichst viele dieser Defekte zu finden. Dafür wird oft ein eingebetteter Test verwendet, der die Schaltung strukturell testet [1].

Im eingebetteten Test werden üblicherweise Zufallsmuster, deterministische Muster oder eine Kombination aus beiden (sog. Mixed-Mode Test) eingesetzt. Die

Zufallsmuster werden durch ein linear-rückgekoppeltes Schieberegister (LFSR) erzeugt. Deterministische Testmuster werden oft auf Basis des Haftfehlermodells generiert und in geeigneter Weise kodiert [2]. Das Haftfehlermodell modelliert das Verhalten von latenten Produktionsdefekten aber nur unzureichend [3]. Die durch das Haftfehlermodell erreichbare Defektüberdeckung kann durch den N-detect Ansatz [4] verbessert werden. Dabei wird jeder Haftfehler mindestens N-mal (oder so oft wie möglich) erkannt. Die Größe der benötigten deterministischen Mustermenge wächst für steigende N deutlich [5].

Um latente Defekte nicht nur zu detektieren, sondern auch zu lokalisieren, reicht eine hohe Defektdeckung nicht aus. Die verwendete Testmuster-menge muss darüber hinaus detaillierte Diagnose-Informationen liefern, indem für möglichst alle verschiedenen Defekte auch unterschiedliche Testantworten an den Schaltungsausgängen provoziert werden.

Der kürzlich vorgestellte partielle pseudo-erschöpfende Test (P-PET) [6] ersetzt die Zufallsmuster in der ersten Phase des Mixed-Mode-BIST durch einen pseudoerschöpfenden Test für einen großen Teil der Schaltung.

Für einen Ausgang x bezeichne $E_x = \{e_1, \dots, e_n\}$ die Menge aller Eingänge, für die ein struktureller Pfad nach x existiert. Die Schaltungsstruktur zwischen den Eingängen E_x und dem Ausgang x wird auch als *Kegel* bezeichnet. Ein Kegel mit Ausgang x wird *pseudoerschöpfend getestet*, wenn alle $2^{|E_x|}$ möglichen Testmuster an dessen Eingängen angelegt werden.

Beim P-PET Verfahren werden alle Kegel bis zu einer gegebenen Größe $|E_x| \leq \text{MAX}_{size}$ pseudoerschöpfend getestet. Dazu werden mehrere Rückkopplungspolynome mit begrenztem Grad berechnet, mit denen ein programmierbares rückgekoppeltes Schieberegister [7] angesteuert wird, um die entsprechenden Eingangsmengen erschöpfend zu belegen. Dadurch wird die Erzeugung pseudoerschöpfender Testmuster auf die Standard-STUMPS Architektur (Bild 1) anwendbar.

Mit diesem Ansatz kann bereits in der ersten Phase eines Mixed-Mode-BIST und mit vernachlässigbarem Hardwaremehraufwand in typischen industriellen Schaltungen im Mittel 65% der Schaltungsstruktur pseudoerschöpfend getestet werden, was die Defektabdeckung im Vergleich zu einem Zufallstest drastisch erhöht.

Da die Defektabdeckung nur eine begrenzte Aussage über die zu erwartende diagnostische Auflösung zulässt, untersucht der vorliegende Beitrag zum ersten mal den Einsatz von P-PET zur Optimierung der Diagnose beliebiger Defekte.

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist dabei allein die Testmustererzeugung auf der Eingangsseite. Für die Schaltungsantworten stehen sehr effiziente Techniken zur Verfügung, um sie ohne Kompromisse bei der diagnostischen Auflösung extrem zu kompaktieren [8], [9].

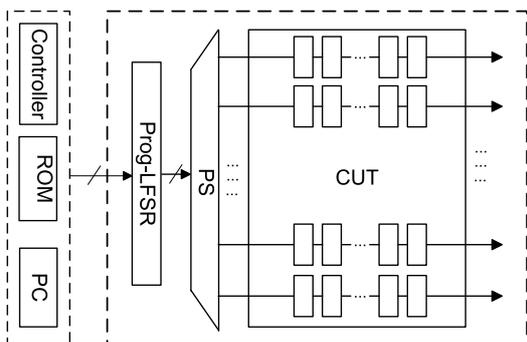


Bild 1: Standard STUMPS Architektur.

In den Abschnitten 2, 3 und 4 wird zunächst untersucht, inwiefern P-PET-Testmuster die diagnostische Auflösung erhöhen können. Abschnitt 5 zeigt anhand industrieller Schaltungen die Effektivität der Diagnose mit P-PET Testmustern. Abschnitt 6 fasst die Erkenntnisse dieses Artikels noch einmal zusammen.

2 Conditional Line Flip Kalkül

Wir untersuchen nun die diagnostische Auflösung für beliebige Defekte mithilfe des Conditional Line Flip (CLF) Kalküls aus [10]. Ein CLF besteht aus einem Opfersignal und einer Aktivierungsbedingung:

$$\text{Signal} \oplus [\text{Bedingung}]$$

Das Opfersignal hat immer dann einen fehlerhaften Wert, wenn die Bedingung zutrifft. Diese Bedingung kann beliebig gewählt werden, wodurch ein CLF alle möglichen Defekte umfasst, die das angegebene Opfersignal direkt beeinflussen. Beispielsweise kann eine ODER-Brücke von Signal a auf Signal b als CLF so dargestellt werden:

$$b \oplus [\bar{b} \wedge a].$$

Die nachfolgende Analyse betrachtet Defekte, die nur ein einziges Opfersignal beeinflussen. Diese Analyse kann bei Bedarf leicht auf größere Defekte verallgemeinert werden, indem jeder CLF durch ein Tupel von CLFs ersetzt wird.

3 Pseudo-Perfekte Diagnostizierbarkeit

Beim P-PET werden alle Schaltungskegel bis zu einer bestimmten Größe MAX_{size} erschöpfend getestet. Bild 2 zeigt eine Schaltung mit zwei Kegeln A und B, die hier durch das P-PET-Verfahren erschöpfend getestet werden. Sowohl an den Eingängen von A als auch von B werden alle möglichen $2^{|A|}$ bzw. $2^{|B|}$ Testmuster angelegt.

Definition Kegellokaler Defekt: Sei S_K die Menge aller internen Signale in einem Kegel K . Dann ist $d = s \oplus [f(S_K)]$ mit $s \in S_K$ und einer beliebigen

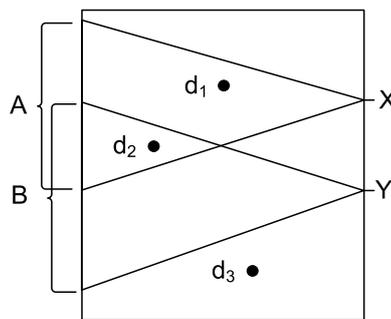


Bild 2: Defekte innerhalb und ausserhalb erschöpfend getesteter Kegel.

Funktion f über Signalwerte ein kegellokaler Defekt in K .

Mit anderen Worten ist ein Defekt kegellokal in K , wenn sowohl das Opfersignal als auch alle Aggressor-signale im Kegel K enthalten sind. In Bild 2 ist d_1 kegellokal in A , d_2 ist kegellokal in A und B und d_3 ist in keinem dieser Kegel kegellokal. Wenn ein Testmuster existiert, das einen kegellokalen Defekt am Ausgang des Kegels beobachtbar macht, wird auch die P-PET Testmenge diesen Defekt abdecken.

Definition Pseudoperfekte Diagnostizierbarkeit: Eine Defektmenge D ist mit einer gegebenen Testmenge T und an einem gegebenen Ausgang o pseudoperfekt diagnostizierbar, wenn für jedes Paar von Defekten $d_a, d_b \in D$ gilt: Wenn ein Testmuster existiert, das d_a und d_b am Ausgang o unterscheidbar macht, so unterscheidet auch die Testmenge T diese Defekte an diesem Ausgang.

Die Provokation unterschiedlicher Antworten ist eine notwendige Bedingung für die Unterscheidung der Defekte durch einen Diagnosealgorithmus und eine damit verbundene hohe diagnostische Auflösung. Wenn eine Defektmenge D mit T an Ausgang o pseudoperfekt diagnostizierbar ist, existiert keine andere Testmenge, die mehr diagnostische Informationen am Ausgang o generieren kann als T .

Satz: Sei K ein Kegel, der mit der P-PET Testmenge T erschöpfend getestet wird. Die Menge aller kegellokalen Defekte zu einem Kegel K

$$D_K = \{s_i \oplus [f(S_K)] | s_i \in S_K\}$$

ist mit T pseudoperfekt diagnostizierbar.

Beweis: Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wählen wir ein Paar von Defekten $d_1, d_2 \in D_A$ (siehe Bild 2). Wenn ein Testmuster existiert, welches für diese beiden Defekte an Ausgang x unterschiedliche Ausgaben provoziert, werden diese Defekte auch mit der P-PET Testmenge unterschiedliche Antworten liefern, weil der Kegel A erschöpfend getestet wird. Das gleiche Argument gilt für zwei Defekte $d_1 = s \oplus [f(S_A)], d_1' = s \oplus [f'(S_A)] \in D_A$, die das gleiche Opfersignal beeinflussen, aber unterschiedliche Bedingungen haben. Durch die erschöpfende Aufzählung von Kegel A werden auch alle logisch möglichen Belegungen der Signale in S_A getestet. Folglich werden auch alle Belegungen b für f und f' aufgezählt, für die gilt $f(b) \neq f'(b)$. Es existiert keine Testmenge, die mehr diagnostische Informationen liefern kann.

4 Diagnostische Auflösung von P-PET

Ein Defekt propagiert wie die meisten internen Signale üblicherweise zu mehreren Ausgängen. An allen diesen Ausgängen könnte der Defekt beobachtet werden

und somit fallen an diesen Ausgängen auch diagnostische Informationen zu diesem Defekt an. Es bleibt somit noch zu untersuchen, inwiefern ein Defekt zu Ausgängen propagiert, die unter einer P-PET Testmenge pseudoperfekt diagnostizierbar sind.

Bild 3 zeigt eine Schaltung mit zwei Ausgängen und 3 Defekten. Das P-PET-Verfahren testet lediglich einen Teil der Schaltungsausgänge pseudoerschöpfend. In Bild 3 wird der Ausgang y pseudoerschöpfend getestet und der Ausgang x nicht. Es gibt nun drei mögliche Propagierungsszenarien.

- 1) Ein Defekt propagiert nur zu nicht überdeckten Ausgängen (Defekt d_1 in Bild 3).
- 2) Ein Defekt propagiert sowohl zu überdeckten als auch zu nicht überdeckten Ausgängen (Defekt d_2 in Bild 3).
- 3) Ein Defekt propagiert nur zu überdeckten Ausgängen (Defekt d_3 in Bild 3).

Wenn ein Defekt zu einem überdeckten Ausgang propagiert, dann ist er auch in dem entsprechenden Kegel enthalten. Es ist beispielsweise nicht möglich, dass in Bild 3 der Defekt d_1 auch nach y propagiert.

Die diagnostische Auflösung für eine Menge von Defekten wie d_1 entspricht der eines Zufallstests. An keinem Ausgang wird eine maximale diagnostische Information garantiert. Bei Defekten wie d_2 wird an einer Untermenge von allen möglichen Beobachtungspunkten die maximale diagnostische Information garantiert. Defekte wie d_3 können perfekt diagnostiziert werden, da an allen Beobachtungspunkten die maximale diagnostische Information garantiert wird.

Durch eine einfache strukturelle Analyse kann ermittelt werden, welche Schaltungsteile durch eine gegebene P-PET Testmenge perfekt diagnostiziert werden kann.

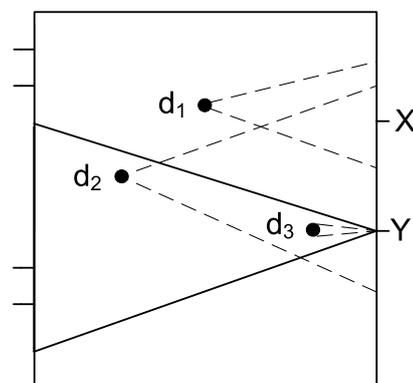


Bild 3: Die drei möglichen Propagierungsszenarien von Defekten.

5 Experimentelle Ergebnisse

Die Experimente wurden mit industriellen Schaltungen durchgeführt, die von NXP bereitgestellt wurden. An allen Schaltungen wurde das P-PET Verfahren aus [6] angewendet, um einen möglichst großen Teil der Schaltungen pseudo-erschöpfend zu testen. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis. Der Schaltungsname in der ersten Spalte korrespondiert zu der Anzahl der Gatter in der Schaltung. Die nächsten zwei Spalten zeigen die Anzahl pseudo-primärer Ein- und Ausgänge. Spalte 4 zeigt die Anzahl der Testmuster, die durch das P-PET Verfahren generiert werden, und die letzte Spalte zeigt den Anteil der pseudo-erschöpfend getesteten Schaltungsstruktur in Prozent.

Schaltung	#PPI	#PPO	#Muster	%PE-getestet
p35k	2912	2229	72544	33
p45k	3739	2550	16780955	49
p89k	4632	4557	25170456	26
p100k	5902	5829	33560334	44
p141k	11290	10502	50342938	29
p239k	18692	18495	58738945	55
p259k	18713	18495	50350359	60
p279k	18074	17827	100681365	47
p286k	18351	17835	100681642	37
p378k	15732	17420	134233460	79
p418k	30430	29809	83916506	43
p483k	33264	32610	92307947	47
p533k	33373	32610	134251094	45

Tabelle 1: P-PET Ergebnis.

An diesen Schaltungen wurden nun zwei Experimente durchgeführt. Zunächst wurde eine strukturelle Analyse vorgenommen, um die Diagnostizierbarkeit mit P-PET Testmustern zu ermitteln. Danach wurde mit einer Auswahl von Schaltungen ein umfangreiches Diagnoseexperiment durchgeführt.

5.1 Strukturelle Analyse

Durch eine einfache Traversierung der Schaltungsstruktur wurde für jedes Gatter in den PE-getesteten Schaltungsbereichen festgestellt, ob strukturelle Pfade nur zu überdeckten Ausgängen führen oder auch zu nicht überdeckten Ausgängen. Tabelle 2 zeigt das Ergebnis.

Spalte 2 zeigt den Anteil der Schaltung, dessen sämtliche Propagierungspfade an überdeckten Ausgängen enden. Es zeigt sich, dass die allermeisten Schaltungsteile, die pseudoerschöpfend getestet werden, an allen möglichen Beobachtungspunkten auch pseudoperfekt diagnostizierbar sind. Bei einem geringen Anteil der Schaltung führen zwar nicht alle strukturellen Pfade zu erschöpfend testbaren Ausgängen, eine bessere Diagnose als bei einem reinen Zufallstest ist aber dennoch möglich. Einzige Ausnahme bildet die Schaltung p378k, die eine sehr spezielle Struktur aufweist und nicht mit den restlichen Schaltungen vergleichbar ist.

Schaltung	% A	% T
p35k	31	2
p45k	41	8
p89k	21	5
p100k	37	7
p141k	26	3
p239k	51	4
p259k	57	3
p279k	43	4
p286k	34	3
p378k	14	65
p418k	36	7
p483k	41	6
p533k	41	4

Tabelle 2: A: Prozentsatz der Gatter, die ausschließlich in erschöpfend testbaren Kegeln liegen.

T: Prozentsatz der Gatter, die nicht ausschließlich, aber in mindestens einem erschöpfend testbaren Kegel liegen.

5.2 Diagnose mit P-PET

In diesem Experiment wurden in eine Auswahl der Schaltungen Defekte injiziert und jeweils versucht, sie mit dem Diagnosealgorithmus aus [11] zu lokalisieren. Die Defekte wurden unabhängig voneinander mit 3 verschiedenen Testmustergruppen analysiert: Eine von einem kommerziellen ATPG generierte Testmustergruppe für Haftfehler, eine P-PET Testmustergruppe und eine pseudozufällig erzeugte Mustergruppe der gleichen Größe wie die P-PET Mustergruppe.

Der Defekttyp wurde für jeden Diagnosefall zufällig aus gängigen Brückenfehlern wie Wired-AND, Transitionsfehler, Haftfehler und Übersprech-Fehler gewählt. Die Opfer- und Aggressorsignale der Defekte wurden rein zufällig aus der gesamten Schaltung gewählt, insbesondere auch aus den Schaltungsteilen, die vom P-PET Verfahren nicht pseudoerschöpfend getestet werden. Dies stellt einen Worst-Case dar, da in einem realen Chip Brücken nur zwischen den Signalen auftreten, die nahe beieinanderliegen. Der Abstand von Signalen im Layout korrespondiert zu einem gewissen Maße zur Struktur der logischen Schaltung, da strukturell zusammengehörige Schaltungsteile auch im Layout nahe zueinander platziert werden. Reale Defekte sind daher häufiger kegellokal als in diesem Experiment.

Eine Diagnose gilt als erfolgreich, wenn eines der Opfersignale des Defektes als alleiniger, bester Kandidat ausgegeben wird. Sobald ein weiterer Kandidat existiert, der als genauso wahrscheinlich angenommen wird, zählt der Defekt hier als nicht lokalisiert.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Diagnoseexperimente. Spalte 2 zeigt die Gesamtanzahl der Defekte, die nacheinander betrachtet wurden. Für jede Schaltung und zufällig gewählten Defekt wurde zunächst eine Diagnose mit Zufallsmustern durchgeführt. Die meisten Defekte konnten durch Zufallsmuster schon perfekt isoliert werden. Die Anzahl der Defekte, die nicht perfekt lokalisiert werden konnten, ist in Spalte 3 dargestellt. Für diese Fälle wurde die Diagnose des jewei-

Schaltung	Fälle	PZ-M. unzureichend	(mit P-PET-M. zusätzlich lokalisiert)	(mit ATPG-M. zusätzlich lokalisiert)
p35k	2700	1559	53	76
p45k	2700	314	20	4
p89k	2700	583	20	17
p100k	900	72	4	1
p141k	325	56	4	4

Tabelle 3: Diagnoseerfolg bei beliebigen Defekten.

ligen Defektes zusätzlich einmal mit P-PET Mustern und einmal mit ATPG Mustern durchgeführt. Spalte 4 zeigt die Zahl der Defekte, für die mit P-PET Mustern zusätzlich eine perfekte Lokalisierung gelang. Spalte 5 zeigt die Zahl der perfekten Diagnosen mit ATPG Mustern.

Es stellt sich heraus, dass die Diagnose mit P-PET Mustern ähnlich erfolgreich ist wie mit ATPG Mustern. Der Diagnoseerfolg bei P-PET Mustern korrespondiert sehr gut mit dem Ergebnis der strukturellen Analyse in Tabelle 2. Dort ergab sich für die Schaltung p45k die beste P-PET-Abdeckung unter den ersten Schaltungen.

Wenn ATPG Testmuster verwendet werden, ist die Kommunikation zwischen dem Automatic Test Equipment (ATE) und dem zu prüfenden Schaltkreis mit Scan-Design ein entscheidender Kostenfaktor und kann nicht vernachlässigt werden.

Im Gegensatz dazu benötigt P-PET-Ansatz keine Testdaten, die beim Selbsttest zur Verfügung gestellt werden müssten. Neben der technischen Vorteilen wie entfallender Speicher für die Daten und verringerter Kommunikationsaufwand hat dies auch einen wesentlichen logistischen Vorteil. Der Kunde kann mit diesem Selbsttestverfahren wertvolle Fehlerdaten erzeugen, ohne Zugriff auf sensible strukturelle Testdaten zu benötigen. Der Halbleiterhersteller kann mit diesen Fehlerdaten schnell auf mögliche Defekte im Chip schliessen und die herstellerübergreifende Fehlersuche beschleunigt sich enorm.

6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag untersucht zum ersten Mal P-PET mit einem fehlermodell-unabhängigen Diagnosealgorithmus. Die strukturelle Analyse an typischen industriellen Schaltungen zeigt, dass die meisten von P-PET pseudoerschöpfend getesteten Schaltungsteile auch gleichzeitig an allen möglichen Ausgängen pseudoperfekt diagnostizierbar sind. Die Diagnoseexperimente zeigen, dass viele Defekte, die mit reinen Zufallsmustern nicht gut diagnostiziert wurden mit einer P-PET Mustermenge nun zusätzlich perfekt diagnostiziert werden können. Im Vergleich mit ATPG-Mustern zeigt P-PET einen ähnlichen diagnostischen Erfolg, überzeugt aber durch den entfallenden Kommunikationsaufwand und geringeren Hardwaremehraufwand für die Speicherung deterministischer Muster.

7 Danksagung

Die Autoren danken NXP für die Bereitstellung der industriellen Schaltungen.

Die vorliegende Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Projekts „Realtest“ (Wu245/5-2) gefördert.

8 Literatur

- [1] J. Rajski, J. Tyszer, M. Kassab, N. Mukherjee, R. Thompson, K. Tsai, A. Hertwig, N. Tamarapalli, G. Mrugalski, G. Eide *et al.*, “Embedded deterministic test for low cost manufacturing test,” in *IEEE International Test Conference (ITC)*, 2002, pp. 301–310.
- [2] A. Hakmi, S. Holst, H. Wunderlich, J. Schlöffel, F. Hapke, and A. Glowatz, “Restrict encoding for mixed-mode BIST,” in *IEEE VLSI Test Symposium (VTS)*, 2009, pp. 179–184.
- [3] E. McCluskey and C. Tseng, “Stuck-fault tests vs. actual defects,” in *IEEE International Test Conference (ITC)*, 2000, pp. 336–343.
- [4] S. Ma, P. Franco, and E. McCluskey, “An experimental chip to evaluate test techniques: Experiment results,” in *IEEE International Test Conference (ITC)*, 1995, pp. 663–672.
- [5] I. Pomeranz and S. Reddy, “Stuck-at tuple-detection: A fault model based on stuck-at faults for improved defect coverage,” in *IEEE VLSI Test Symposium (VTS)*, 2002, pp. 289–294.
- [6] A. Mumtaz, M. Imhof, and H. Wunderlich, “P-PET: Partial Pseudo-Exhaustive Test for High Defect Coverage,” in *accepted for IEEE International Test Conference (ITC)*, 2011.
- [7] S. Hellebrand, S. Tarnick, J. Rajski, and B. Courtois, “Generation of vector patterns through reseeding of multiple-polynomial linear feedback shift registers,” in *IEEE International Test Conference (ITC)*, 1992, pp. 120–129.
- [8] S. Holst and H. Wunderlich, “A diagnosis algorithm for extreme space compaction,” in *IEEE Design Automation and Test in Europe (DATE)*, 2009, pp. 1355–1360.
- [9] M. Elm and H. Wunderlich, “BISD: scan-based built-in self-diagnosis,” in *IEEE Design Automation and Test in Europe (DATE)*, 2010, pp. 1243–1248.
- [10] H. Wunderlich and S. Holst, “Generalized fault modeling for logic diagnosis,” *Models in Hardware Testing*, pp. 133–155, 2010.
- [11] S. Holst and H. Wunderlich, “Adaptive Debug and Diagnosis without Fault Dictionaries,” in *IEEE European Test Symposium (ETS)*, 2007, pp. 7–12.