論文 92-29A-8-13

March Test 기법의 한계 및 알고리듬 (반도체 메모리의 커플링 고장을 중심으로)

The Limit of the March Test Method and Algorithms (On Detecting Coupling Faults of Semiconductor Memories)

余 定 模*, 趙 相 福**

(Jeong Mo Yeo and Sang Bock Cho)

要 約

첫째, 반도체 메모리의 커플링고장이 상세히 분류되었다. 메모리 셀들 사이에서 커플링 현상이 파급되어 발생하는 연쇄 커플링고장이 도입, 정의되었으며, 그 매핑 관계도 서술되었다. 커플링 셀들이 하나의 커플된 셀을 공유하는 연결된 커플링고장과 그 고장의 차수가 정의되었다. 둘째, 고착고장, 천이고장, 번지해독기 고장, 연결되지 않은 2-커플링고장 및 연결되지 않은 연쇄 커플링 고장을 검출하는 "알고리듬 가"가 제안되었다. 이 알고리듬은 기존의 알고리듬들보다 적은 시간복잡도를 가지며, 더 높은 고장 검출능력을 가진다. 셋째, 하나의 번지순서를 사용한 march test가 검출할 수 있는 차수 2의 연결된 2-커플링고장은 97.796%라는 것이 입증되었다. 이 검출한계까지 테스트할 수 있는 "알고리듬 나"가 제안되었다. 이 알고리듬은 기존의 알고리듬들보다 적은 시간복잡도를 가지며, 더 높은 고장 검출능력을 가진다.

Abstract

First, the coupling faults of semiconductor memory are classified in detail. The chained coupling fault is introduced and defined, which results from sequential influencing of the coupling effects among memory cells, and its mapping relation is described. The linked coupling fault and its order are defined. Second, the deterministic "Algorithm GA" is proposed, which detects stuack-at faults, transition faults, address decoder faults, unlinked 2-coupling faults, and unlinked chained coupling faults. The time complexity and the fault coverage are improved in this algorithm. Third, it is proved that the march test of an address sequence can detect 97.796% of the linked 2-coupling faults with order 2. The deterministic "Algorithm NA" proposed can detect to the limit. The time complexity and the fault coverage are improved in this algorithm.

*正會員, 釜山工業大學 電子計算學科
(Dept. of Computer Sci., Pusan Nat'l Univ. of Tech.)

**正會員, 蔚山大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Ulsan Univ.)

接受日字 : 1992年 5月 1日

I. 서 론

최근, 반도체 산업이 급속한 발전을 거듭함에 따라 반도체 메모리 분야도 상당한 진전을 보여 왔다. 하지만, 반도체 메모리의 선폭(line width)이 줄어들고, 내부 동작전압이 낮아짐으로 인해 이전보다 고장 발생빈도가 높아졌을 뿐만 아니라, 고장의 종류도 많아졌으며 고장의 검출도 복잡하고 어렵게 되었다. 이로인해 메모리의 생산

비용보다 고장 검출비용이 높아지기도 하고, 때로는 고장 발생으로 인해 메모리의 생산능력(yield)이 나빠지기도 하였다.

반도체 메모리의 고착고장(stuck-at fault)[1~3]과 천이 고장(transition fault)[1~3]은 비교적 고장모델이 간단하고 고장검출이 용이하다. 그러나, 커플링고장[4~8]이나 PSF(Pattern Sensitive Fault)[7, 8]는 고집적으로 인해 고장모델도 복잡하고 고장검출이 어렵다. Ⅱ장에서는 셀 상호간에 서로 영향을 주어 생기는 커플링고장을 중심으로 반도체 메모리의 고장모델을 상세히 분류한다. 다른 알고리듬들에서 고려되지 않았던 inversion 커플링고장이 고장모델로서 고려되었다. 셀들이 아주 가까이 있음에 따라 커플링 현상이 다른 셀로 파급되어 연쇄적으로 고장이 발생할 수 있다. 이와같은 고장을 연쇄 커플링고장으로 정의하고, 그 매핑관계를 설명한다. 또한, 여러 개의 커플링 셀들이 하나의 커플된 셀을 공유하여 발생한 연결된 커플링고장[6, 8]을 정의하고, 연결된 커플링고장에 대한 차수의 개념을 도입한다.

커플링고장과 PSF는 복잡하고 검출이 어려울 뿐만 아니라, 완전히 검출한다는 것은 불가능하다.[7, 8] 본 연구에서는 커플링고장의 검출에 관하여 고려하였다. RAM 테스트에서 deterministic 테스트가 random 테스트보다 전체 메모리 access 수가 적기 때문에 더 좋은 테스트라는 것이 입증되었다.[9, 10] Deterministic 테스트중 march test 기법은 기존의 알고리듬들에서 많이 사용되어 왔으며,[4~8] 그 적용이 쉬우므로 본 연구에서 제안되는 알고리듬들도 모두 march test 기법을 사용한다. 커플링고장중 연결되지 않은 2-커플링고장이 가장 기본적이며 가장 많이 발생하므로, 우선 이 고장을 완전히 검출할 수 있도록 알고리듬을 개발한다. 따라서, Ⅲ장에서는 연결되지 않은 2-커플링고장의 각각을 검출할 수 있는 최소의 march elements를 구하고, covering table 기법[6]을 사용하여 "알고리듬 가"를 구성하고, 이를 제안한다. "알고리듬 가"는 기존의 알고리듬들의 시간복잡도보다 적은 10N의 시간복잡도를 가지며 더 높은 고장 검출능력을 가진다.

기존의 알고리듬들[1~6]은 연쇄 커플링고장 및 inversion 커플링고장들을 고려하지 않았다. 이런 고장모델들을 고려할 때, march test 기법으로서는 결코 검출할 수 없는 커플링고장들이 있다. Ⅳ장에서는 하나의 번지순서를 사용한 march test가 검출할 수 있는 차수 2의 연결된 2-커플링고장은 97.796%라는 것을 입증한다. 그리고, 커플링고장 검출한계까지 검출할 수 있는 "알고리듬 나"를 제안한다. "알고리듬 나"는 15N의 시간복잡도로서 기존의 알고리듬들보다 시간복잡도가 적을 뿐만 아니라, 고장 검출범위(fault coverage)도 넓다.

Ⅴ장에서는 제안된 알고리듬들과 기존의 알고리듬들을 시뮬레이션하여 그 결과를 비교, 분석함으로써 제안된 알고리듬들이 개선된 것을 입증한다.

Ⅱ. 반도체 메모리의 고장모델

RAM의 테스트는 DC 파라메터 테스트, pattern sensitivity 테스트 및 functional 테스트등으로 분류된다.[7] Functional 테스트는 RAM 회로를 오동작시키는 영구적인 고장으로 논리레벨 측면에서 테스트하는 것을 말하며, 본 연구에서 취급하는 테스트이다. 테스트는 고장을 검출하는 테스트와 고장을 검출하고 고장난 위치를 찾아내는(locate) 테스트로 나눌 수 있는데, 메모리의 technology를 모르는 측면에서의 테스트는 location의 의미가 없으므로 주로 고장검출만을 위한 테스트를 구성할 것이다.

RAM의 회로는 복잡하나 동작에 영향을 미치지 않도록 RAM 모델을 축소시켜 그림 1과 같이 번지해독기, 메모리 셀 어레이 및 read/write logic으로 구성된다[8]고 하고, 1워드가 1비트인 N개의 워드를 가지며 read 고장은 발생하지 않는다[6, 8]고 한다. 또한, 번지해독기에 고장이 발생하였을 때, 순서회로(sequential circuit)가 되지 않는다고 가정한다.[4, 6, 8]

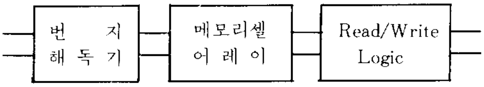


그림 1. 간소화된 메모리 모델
Fig. 1. The reduced RAM model.

Read/write logic에서 발생하는 모든 고장은 메모리 셀 어레이의 고장으로 매핑되고,[4, 6, 8] 번지해독기의 고장검출은 [8]의 검출조건을 만족하면 되므로, 메모리 셀 어레이의 고장과 번지해독기 고장(AF ; Address decoder Fault)에 대해서만 고려하기로 한다.

1. 고착고장(SAF ; Stuck-At Fault)[1~3]

RAM의 세 부분의 회로에서 발생할 수 있으며, 어떤 선(lines)이나 셀이 0이나 1의 값으로 고정되어 있는 고장을 말한다.

2. 천이고장(TF ; Transition Fault)[1~3]

메모리 셀 어레이와 read/write logic에서 발생하며,

한 셀의 내용이 천이(transition)될 수 없는 고장을 말한다.

3. 커플링고장(CF : Coupling Fault)[4~8]

선이나 셀들 사이에서 발생하고, 한 셀의 내용변화가 다른 셀의 내용에 영향을 미치는 고장이다.

1) 2-커플링고장(2-CF : 2-Coupling Fault)

i 셀(번지가 i 임을 뜻함)이 커플링 셀(coupling cell)이고, k 셀이 커플된 셀(coupled cell)일 때, 두 셀 사이에서 발생할 수 있는 2-CFs는 표 1과 같다.

표 1. i 셀과 k 셀 사이에서 발생 가능한 2-CFs
Table 1. Possible 2-CFs between i cell and k cell.

Fault model	Possible 2-CFs
1-way asymmetric CFs	$(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$, $(\uparrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$ $(\downarrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$, $(\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$
2-way asymmetric CFs	$(\updownarrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$, $(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k, \downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$ $(\updownarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$, $(\uparrow_i \Rightarrow \downarrow_k, \downarrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$
1-way symmetric CFs	$(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$, $(\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$
2-way symmetric CFs	$(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$, $(\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$
1-way inversion CFs	$(\uparrow_i \Rightarrow \updownarrow_k)$, $(\downarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k)$
2 way inversion CFs	$(\updownarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k)$

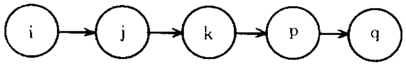
표 1에서$(\uparrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$와 같은 표시는 i 셀이 0에서 1로 변화하면, k 셀이 1에서 0으로 변화하는 것을 뜻한다. 커플링 셀의 $\updownarrow$ 표시는 양방향을 뜻하며, 커플된 셀의 $\updownarrow$ 표시는 항상 셀의 상태가 변화하는 것을 뜻한다. 대칭 CFs는 비대칭 CFs에 포함되므로, i 셀과 k 셀 사이에서 발생 가능한 서로 다른 종류의 고장은 11가지이다.[8]에서는 idempotent CFs와 inversion CFs로 분류하였다.

2) 연쇄 커플링고장(CCF : Chained Coupling Fault)

정의 1) 한 셀의 내용변화가 연쇄적으로 다른 셀에게 영향을 주어 커플링의 효과가 파급되는 CF를 연쇄커플링고장이라 한다.

정의 2) CCF의 원인이 되는 커플링 셀을 원천 커플링 셀(the source-coupling cell)이라 한다. 첫번째 커플되어 있는 셀을 첫번째 커플된 셀(the first coupled cell)이라 하고, 이하 계속적으로 번호가 부여된 커플된 셀로 정의한다. 영향을 받아 다른 셀에게 영향을 주는 첫번째 셀을 첫번째 영향주는 커플링 셀(the first caused-coupling cell)이라 하고, 이하 계속적으로 n번째 커플된 셀은 n번째 영향주는 커플링 셀(the n-th caused coupling cell)이 된다. 더 이상 영향을 파급시키지 않는 커플된 셀을 커플된 종단 셀(the terminate coupled cell)이라 한다.

예를 들어, 그림 2와 같은 CCF가 발생했을 때, i셀을 원천 커플링 셀, j셀을 첫번째 커플된 셀임과 동시에 첫번째 영향주는 커플링 셀, k(p) 셀은 두(세)번째 커플된 셀임과 동시에 두(세)번째 영향주는 커플링셀, q셀은 네 번째 커플된 셀임과 동시에 커플된 종단 셀이다.



$(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_j \Rightarrow \downarrow_k \Rightarrow \uparrow_p \Rightarrow \updownarrow_q)$

그림 2. 연쇄 커플링고장의 예
Fig. 2. An example of a CCF.

정의 3) 원천 커플링 셀과 커플된 셀들로서 구성되는 통로를 연쇄통로(the chained path)라 한다.

CCF는 연쇄통로가 루프를 포함하지 않는 경우와 루프를 포함하는 경우로 구분할 수 있다.

정리 1) 루프를 포함하지 않는 CCF는 모두 단방향 비대칭 CF로 매핑된다.

증명) 그림 3에서 원천 커플링 셀을 x_0, 영향받은 셀들 중 임의의 한 셀을 x_l라 하자. 가정된 고장은 루프를 포함하지 않으므로 x_l 셀은 x_{l-1}의 영향을 오직 한번 받으며, 이 영향은 x_0에서 파급된 것이다. 따라서, x_{l-1} 셀이 x_l 셀에게 영향주는 CF 형태를 x_0 셀이 x_l 셀에게 영향주는 CF 형태로 매핑할 수 있다. 그러므로, 가정된 고장의 통로상에 있는 모든 CF는 x_0 셀이 커플링 셀, 통로상의 각 셀이 커플된 셀로 되는 단방향 비대칭 CF로 매핑된다.

Q.E.D.

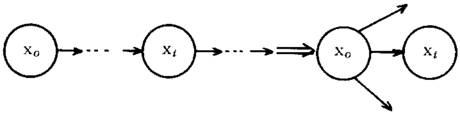


그림 3. 루프를 포함하지 않는 CCF의 매핑
Fig. 3. The mapping of a CCF with no-loop.

정리 2) 연쇄통로가 하나의 루프로 구성되든지 또는 연쇄통로가 원천 커플링 셀과 하나의 루프로 구성되고, 루프상의 모든 CF가 양방향 inversion CF로 된 CCF는 검출할 수 없다.

증명) 루프상의 모든 고장이 양방향 inversion CF이므로, 루프상의 임의의 한 셀이 영향을 받으면, 다음 셀의 상태가 어떤 상태에 있든지 관계없이 반드시 다음 셀의 상태를 바꾸어 버린다. 이 현상이 루프를 따라 전파되

고, 루프상의 셀의 상태는 계속적으로 변화하게 되므로 가정된 고장은 검출되지 아니한다. Q.E.D.

실제적으로 정리 2와 같은 경우의 발생은 극히 적을 것이며, 만약 있다 하더라도 영원한 발진은 없기 때문에 셀의 비트 값을 read 하기 전까지는 발진이 끝난다고 가정할 것이다. 따라서, 정리 2와 같은 경우의 고장도 모두 단방향 비대칭 CF로 매핑된다.

보조정리) 양방향 inversion CF 이외의 고장을 하나 이상 가지는 CCF는 연쇄통로상의 일부 또는 전부가 단방향 비대칭 CF로 매핑된다.

증명) 연쇄통로상의 루프 내에서 하나 이상이 양방향 inversion CF가 아니라면, 커플링의 효과가 계속 파급되지 못하고 멈추게 되어 정리 1과 같은 방법으로 루프 내의 모든 고장은 단방향 비대칭 CF로 매핑된다. 또한, 연쇄통로상의 루프가 발진하더라도 루프에 연결된 고장이 하나 이상 양방향 inversion CF가 아니면, 그러한 고장들은 정리 1과 같은 방법으로 단방향 비대칭 CF로 매핑된다. 따라서, 연쇄통로상의 CF는 일부 또는 전부가 단방향 비대칭 CF로 매핑된다. Q.E.D.

3) 연결된 커플링고장(LCF ; Linked Coupling Fault)

정의 4) 두 개 이상의 커플링 셀이 하나의 커플된 셀을 공유하여 CF가 발생할 때, 커플링 고장들이 연결되어 있다(link)고 하고, 그 때의 고장을 연결된 커플링고장(the linked coupling fault)이라고 한다.[8]

정의 5) 하나의 LCF에서 연결되어 있는 CF의 수를 LCF의 차수(the order of a LCF)라 한다.

LCF 중에서 그림 4와 같은 차수 2의 LCF가 가장 많이 발생하며 가장 기본적인 고장이다.

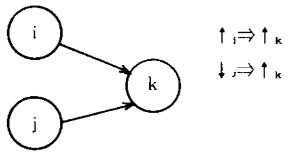


그림 4. 차수 2의 연결된 2-CF
Fig. 4. A linked 2-CF with order 2.

i 셀과 k 셀 사이, 그리고, j 셀과 k 셀 사이에서 발생할 수 있는 2-CFs는 각각 11가지이므로, i, j 및 k 셀로 구성되는 차수 2의 연결된 2-CFs는 121 가지이다. 또한, 각 고장에 대해 i, j 및 k 셀의 순서가 6가지 있으므로, 차수 2의 2-CFs는 모두 726 가지이다.

CCF나 LCF는 테스트시 고장효과를 소멸(mask) 즉, 고장이 발생되지 않은 것처럼 동작시킬 수 있으므로 테스트시 주의해야 한다. CCF나 LCF의 개념은 CF에만 국한되는 것이 아니다. CF가 아닌 고장에서도 적용되고 또한, 서로 다른 종류의 고장들 사이에서도 발생한다.

4) k-커플링고장(k-CF ; k-Coupling Fault)

k개로 구성된 셀들의 집합이 있다고 하자. 커플링 셀과 커플된 셀을 제외한 (k-2)개의 셀의 상태가 어떤 일정한 상태에 있을 때, 커플링 셀이 커플된 셀에 영향을 주어 CF가 발생하면 k-커플링고장이 발생하였다고 한다($k>=2$). k개의 셀의 집합들이 서로 분리되어(disjoint) 발생된 k-CF를 제한된 k-CF(the restricted k-CF)라 한다. 서로 분리되어 있지 않으면 일반적인 k-CF(the general k-CF)라 한다. 일반적인 k-CF의 완전한 검출은 불가능하고 고장 발생확률이 적으므로, 제한된 k-CF를 많이 검출한다.

4. Pattern Sensitive Fault(PSF)

메모리 셀 어레이 또는 데이타 레지스터등에서 발생하며, 주위 셀의 상태 또는 주위 셀의 내용변화에 의하여 셀의 내용이 변화하는 고장이다.

Ⅲ. 연결되지 않은 2-커플링고장의 검출

March test 기법은 deterministic 테스트의 일종으로 그 구성이 쉬울 뿐만 아니라, 구현하기가 용이하므로 고장 검출기법으로 많이 사용한다. 본 연구에서도 메모리의 CF 검출을 위하여 march test 기법을 사용하여 알고리듬을 구성한다.

1. March test의 구성

MT(March Test)는 다수의 ME(March Element)로 구성된다. ME의 표기에서 Rx는 x($\in$ {0, 1})를 read 하고 Wx는 x를 write하는 것을 뜻한다. 윗줄을 한 ME는 번지를 증가시켜 가면서 ME를 적용시키는 것을 뜻하고, 밑줄을 한 ME는 번지를 감소시켜 가면서 ME를 적용시키는 것을 뜻하며, 윗줄이나 밑줄을 표시하지 않은 ME는 번지를 증가시키든지 감소시키든지 어느 한 방향으로 ME를 적용시키는 것을 뜻한다. 세미콜론(;)은 ME 의 끝을 뜻한다.

메모리의 초기화 동작을 위한 ME는 하나의 write로 구성하고, 초기화가 아닌 모든 ME의 첫번째 동작은 고장이 검출되었는지 확인하기 위한 read 동작이어야 한다. 동일한 동작이 연속될 때는 첫번째 동작 이후의 반복되는 동작은 무의미하여 하나의 동작만으로 충분하다. Write 동작이 연속될 때는 셀의 상태를 변화시키도록 구성되어야 한다. Write 동작들 사이에는 read 동작이 있어도 좋다.

2. 연결되지 않은 2-커플링고장 검출을 위한 알고리듬

커플링 셀인 i 셀과 커플된 셀인 k 셀 사이의 연결되지 않은 2-CFs에 대하여 생각해 보자. i 셀과 k 셀의 순서는 2가지가 있으므로 두 셀 사이의 연결되지 않은 2-CFs는 22가지가 있고, 각 경우를 모두 검출할 수 있도록 테스트를 구성하여야 한다. 메모리 셀 어레이의 0 또는 1 상태에서 각 고장을 검출할 수 있는 최소의 MEs를 표 2에 나타내었다. (i>k)인 메모리 셀 어레이가 0 상태에서 ($\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k$)와 같은 고장은 표 2에서 보는 바와 같이 $\underline{R_0W_1}$;에 의하여 검출될 수 있다. 표 2의 빈칸은 그 경우의 고장을 검출할 수 있는 ME가 최소가 아니므로 표시되지 않았다.

표 2. 연결되지 않은 2-CFs를 검출하는 최소의 MEs 목록

Table 2. The list of minimum MEs for detecting unlinked 2-CFs.

cell location / cell state / no.	unlinked 2 CF	minimum MEs to detect the corresponding CF: i > k, state 0	i > k, state 1	i < k, state 0	i < k, state 1
a	$\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k$	$\underline{R_0W_1}$:		$\overline{R_0W_1}$:	
b	$\uparrow_i \Rightarrow \downarrow_k$	$\overline{W_1}$: R_1:		$\underline{W_1}$: R_1:	
c	$\downarrow_i \Rightarrow \uparrow_k$		$\overline{W_0}$: R_0:		$\underline{W_0}$: R_0:
d	$\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k$		$\underline{R_1W_0}$:		$\overline{R_1W_0}$:
e	$\updownarrow_i \Rightarrow \uparrow_k$	$\underline{R_0W_1}$:	$\overline{W_0}$: R_0:	$\overline{R_0W_1}$:	$\underline{W_0}$: R_0:
f	$\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k$, $\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k$	$\underline{R_0W_1}$:	$\underline{R_1 : W_0}$:	$\overline{R_0W_1}$:	$\overline{R_1\ W_0}$:
g	$\uparrow_i \Rightarrow \downarrow_k$, $\downarrow_i \Rightarrow \uparrow_k$	$\overline{W_1}$: $\overline{R_1}$:	$\overline{W_0}$: $\overline{R_0}$:	$\underline{W_1}$: $\underline{R_1}$:	$\underline{W_0}$: $\underline{R_0}$:
h	$\updownarrow_i \Rightarrow \downarrow_k$	$\overline{W_1}$: R_1:	$\underline{R_1W_0}$:	$\underline{W_1}$: R_1:	$\overline{R_1W_0}$:
i	$\uparrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$	$\underline{R_0W_1}$: or $\overline{W_1}$:$^{+}$ R_1:$^{++}$		$\overline{R_0W_1}$: or $\underline{W_1}$:$^{+}$ R_1:$^{++}$	
j	$\downarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$		$\underline{R_1W_0}$: or $\overline{W_0}$:$^{+}$ R_0:$^{++}$		$\overline{R_1W_0}$: or $\underline{W_0}$:$^{+}$ R_0:$^{++}$
k	$\updownarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$	$\underline{R_0W_1}$: or $\overline{W_1}$:$^{+}$ $\overline{R_1}$:$^{++}$	$\underline{R_1W_0}$: or $\overline{W_0}$:$^{+}$ $\overline{R_0}$:$^{++}$	$\overline{R_0W_1}$: or $\underline{W_1}$:$^{+}$ $\underline{R_1}$:$^{++}$	$\overline{R_1W_0}$: or $\underline{W_0}$:$^{+}$ $\underline{R_0}$:$^{++}$

$^{+}$: ME앞에 한개 이상의 write가 있는경우 고장이 소멸될 수 있음.

$^{++}$: ME 뒤에 두개 이상의 write가 있는 경우 고장이 소멸될 수 있음.

정리 3) 표 2에 표시된 모든 MEs는 연결되지 않은 2-CFs를 검출할 수 있는 최소의 MEs이다.

증명) 표 2의 MEs는 모두 하나의 read와 하나의 write로 구성되어 있으므로 최소의 MEs이다. Q.E.D.

CF를 검출할 수 있는 최소의 ME가 메모리 셀 어레이의 어느 한 상태에서만 존재하면, 그 ME를 필수적으로 MT에 포함시켜야 하고, 메모리 셀 어레이의 두 상태 모두에서 최소의 MEs가 존재하면, 어느 한 상태에서의 ME를 MT에 포함시켜야 한다.

표 2의 MEs가 각 고장들을 얼마나 검출할 수 있는지 표 3의 covering table에 이를 표시하였다.

표 3. 연결되지 않은 2-CFs 검출을 위한 covering table

Table 3. The covering table for detecting unlinked 2-CFs.

Fault name	March element ①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	㉒	㉝	㊹
a1			0										0	0
a2	0												0	0
b1					0	0							0	
b2									0	0			0	0
c1							0	0					0	0
c2											0	0		0
d1				0									0	0
d2		0											0	0
e1			0				0	0					0	0
e2	0										0	0	0	0
f1			0	0									0	0
f2	0	0											0	0
g1						0		0					0	0
g2										0		0	0	0
h1				0	0	0							0	0
h2		0							0	0			0	0
i1			0		0	0							0	0
i2	0								0	0			0	0
j1				0			0	0				0	0	0
j2		0									0	0	0	0
k1			0	0		0		0					0	0
k2	0	0								0		0	0	0

※ Remark

①	②	③	④	⑤	⑥
$\overline{R_0W_1}$:	$\overline{R_1W_0}$:	$\underline{R_0W_1}$:	$\underline{R_1W_0}$:	$\overline{W_1}$;R_1 :	$\overline{W_1}$;$\overline{R_1}$:
⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
$\overline{W_0}$;R_0 :	$\overline{W_0}$;$\overline{R_0}$:	$\underline{W_1}$;R_1 :	$\underline{W_1}$;$\underline{R_1}$:	$\underline{W_0}$;R_0 :	$\underline{W_0}$;$\underline{R_0}$:
⑬			⑭		
$\overline{R_0W_1}$;$\overline{R_1W_0}$;$\underline{R_0W_1}$;$\underline{R_1W_0}$:			$\underline{R_1W_0}$;$\underline{R_0W_1}$;$\overline{R_1W_0}$;$\overline{R_0W_1}$:		

표 3의 fault name에서 첫자의 알파베트 문자는 표 2의 고장 no.와 같은 고장을 뜻하며, 두번째의 숫자 1은 $i>k$인 셀 순서를 뜻하고, 숫자 2는 $i<k$인 셀 순서를 뜻한다. 표 3에서 ①부터 ⑫까지의 MEs는 표 2에서 나타난 최소의 MEs 이고, ⑬과 ⑭는 가장 많이 고장을 검출할 수 있는 최소의 MEs 네 개로서 구성된 MTs이다. 표 3에서 0 표시된 고장은 해당 ME로서 검출될 수 있는 경우이며, 표시되지 않은 고장은 해당 ME로서 검출되지 않는 경우를 뜻한다.

⑬의 MT는 c2의 고장을 제외한 연결되지 않은 2-CFs 모두를 검출한다. c2의 고장을 검출할 수 있는 ME는 ⑪(⑫는 ⑪에 포함되므로 ⑫도 가능함)이다. ⑪을 포함시키기 위해 ⑬에 R_0; 를 추가시키면, (1)과 같은 MT가 되며, 이는 연결되지 않은 2-CFs 모두를 검출한다.

$$\overline{R_0W_1};\ \overline{R_1W_0};\ \underline{R_0W_1};\ \underline{R_1W_0};\ R_0; \qquad (1)$$

⑭의 MT도 연결되지 않은 2-CFs 모두를 검출할 수 있도록 (1)과 같은 방법으로 구성하면 (2)와 같이 된다.

$$\underline{R_1W_0};\ \underline{R_0W_1};\ \overline{R_1W_0};\ \overline{R_0W_1};\ R_1; \qquad (2)$$

(1)과 (2)의 각 ME의 번지 적용순에 쌍대를 취해서 구해진 MTs를 (3)과 (4)에 나타내었다. (3)과 (4)도 covering table에 표시하여 보면, 연결되지 않은 2-CFs 모두가 검출된다는 것을 알 수 있다.

$$\underline{R_0W_1};\ \underline{R_1W_0};\ \overline{R_0W_1};\ \overline{R_1W_0};\ R_0; \qquad (3)$$
$$\overline{R_1W_0};\ \overline{R_0W_1};\ \underline{R_1W_0};\ \underline{R_0W_1};\ R_1; \qquad (4)$$

(1)~(4)에 초기화 조건까지 포함시켜 MTs를 구성한 것이 "알고리듬 가-1"과 "알고리듬 가-2"이다. 여기서, x는 0 또는 1이다. "알고리듬 가-1" 또는 "알고리듬 가-2"를 "알고리듬 가"라 한다.

$$Wx;\ \overline{RxWx'};\ \overline{Rx'Wx};\ \underline{RxWx'};\ \underline{Rx'Wx};\ Rx;$$
(알고리듬 가-1)

$$Wx;\ \underline{RxWx'};\ \underline{Rx'Wx};\ \overline{RxWx'};\ \overline{Rx'Wx};\ Rx;$$
(알고리듬 가-2)

정리 4) "알고리듬 가"는 고착고장, 천이고장, 번지해독기 고장 및 연결되지 않은 2-CFs를 검출하고, 셀을 read할 때 셀의 상태가 안정되어·있다면 연결되지 않은 CCFs도 검출한다. Q.E.D.

증명) 모든 셀에 0과 1을 write하고 read하므로 모든 고착고장을 검출하고, 모든 셀에 대해 상태 변화를 시키고 read하므로 모든 천이고장을 검출하고, [8]의 번지해독기 검출조건을 만족하므로 번지해독기 고장을 검출한다. "알고리듬 가"는 표 2에서 표시한 최소의 MEs를 포함하고 있으므로, 연결되지 않은 2-CFs 모두를 검출한다. 셀을 read할 때 셀의 상태가 안정되어 있다면, CCFs는 모두 단방향 비대칭 CFs로 매핑되므로 연결되지 않은 CCFs도 검출한다. Q.E.D.

"알고리듬 가"는 10N의 시간복잡도(time complexity)를 가진다. 표 4에서 보는 바와 같이 연결되지 않은 2-CFs 를 검출하는 알고리듬들과 비교하여 시간복잡도가 적다.

표 4. 연결되지 않은 2-CFs를 검출하는 알고리듬들
Table 4. Algorithms for detecting unlinked 2-CFs.

Algorithms	Time complexity
Algorithm A in [4]	30N
TEST A in [5]	15N
TEST B in [5]	17N
Procedure 1 in [6]	37N
Algorithm GA	10N

또한, "알고리듬 가"는 다른 알고리듬들이 고려하지 않았던 inversion CFs 및 CCFs를 고려하여 테스트를 구성하였으므로 고장 검출능력이 증가한다.

Ⅳ. March test의 커플링고장 검출한계 및 알고리듬

2-CFs가 서로 연결되어 있지 않을 때는 표 4의 여러 알고리듬들에 의해서 검출된다. 그러나, 커플링고장이 연결되어 있을 때는 고장효과가 소멸되는 경우가 생기므로 쉽게 고장이 검출되지 않는다. 따라서, 본 장에서는 MT 기법을 사용하여 연결된 2-CFs를 검출할 때의 한계와 그 한계까지 검출할 수 있는 알고리듬에 대하여 논한다.

1. March test의 커플링고장 검출한계

두 개의 2-CFs, K_i(i 셀이 커플링 셀, k 셀이 커플된 셀)와 K_j(j셀이 커플링 셀, k 셀이 커플된 셀)가 서로 연결되어 차수 2의 연결된 2-CF, K_{ij}가 형성되었다고 가정하자. K_i 및 K_j 고장의 명칭은 표 2의 고장 no.를 따르고, K_{ij}의 고장명칭은 K_i의 고장명칭과 K_j의 고장명

칭을 연결하여 사용한다. 예를 들어, ($\updownarrow_i \Rightarrow \uparrow_k$)와 ($\uparrow_j \Rightarrow \downarrow_k$)이 서로 연결되어 있는 고장 K_{ij}의 명칭은 eb이다. 임의의 고장 K_{ij}는 i, j 및 k 셀의 순서에 따라 6가지 경우가 있다. 셀들의 순서에 따라 고장 K_{ij}를 구분하기 위하여 다음과 같이 셀들의 순서에 번호를 부여하고, K_{ij}의 고장 명칭에 추가하여 표시한다.

$$1 : i<j<k,\ 2 : j<i<k,\ 3 : k<i<j,$$
$$4 : k<j<i,\ 5 : i<k<j,\ 6 : j<k<i$$

예를 들어, 고장 eb3은 셀순서가 k<i<j일 때의 고장 eb를 뜻한다.

두 커플링 셀이 연속되는 셀의 순서에서는 먼저 오는 커플링 셀에 ME가 적용되어 고장이 발생하고, 뒤에 오는 커플링 셀에 ME가 적용되어 이미 발생된 고장효과가 소멸될 수가 있다. 이로인해, 연결된 CF의 검출이 어려워지게 된다. [5]의 TEST A는 inversion CF를 고려하지 않았으므로 ai4와 같은 고장이 검출되지 아니한다. 하나의 번지순서를 사용하여 구성한 기존의 MTs에서 inversion CF를 고려한다면, kk1과 같은 고장은 검출되지 아니한다. 따라서, 본 연구에서 이를 규명하고자 한다.

5 또는 6의 셀 순서를 가지는 연결된 2-CFs는 연결되지 않은 2-CFs과 같이 ME가 적용되므로 쉽게 고장이 검출된다. 그러나, 두 커플링 셀이 연속하여 오는 경우의 셀순서에서는 하나의 커플링 셀이 커플된 셀에 영향을 주고 난 후, 커플된 셀이 read되기 전에 다른 하나의 커플링 셀이 커플된 셀에 영향을 주어 커플된 셀을 read하는 경우로서, 두 커플링 셀이 홀수번 커플된 셀에 영향을 주어 상태변화를 시키면 고장이 검출되지만, 짝수번 영향을 주어 상태변화시키면 고장이 검출되지 아니한다.

정리 5) 두 고장이 동일한 종류의 양방향 inversion CF로 연결되어 있으며, 두 커플링 셀이 연속하여 오는 차수 2의 연결된 2-CF는 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 검출되지 아니한다.

증명) 각각의 양방향 inversion CF에 대해 두 커플링 셀이 연속하여 올 수 있는 모든 경우를 구성 가능한 모든 MEs로서 검출되지 않는 것을 증명하면 된다.

a) ($\uparrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$) 고장과 ($\uparrow_j \Rightarrow \updownarrow_k$)고장이 연결되어 있는 경우

a.1) 셀 순서가 i<j<k일 때, 즉, ii1 고장의 경우

a.1.1) 하나의 번지증가순 ME로서 검출하려고 할 때

셀의 상태가 0(1)에서 구성할 수 있는 MEs는 R_0W_1; (R_1W_0;), $R_0W_1W_0$;($R_1W_0W_1$;), $R_0W_1W_0W_1$;($R_1W_0W_1W_0$;), $R_0W_1W_0W_1W_0$;($R_1W_0W_1W_0W_1$;), 또는 $R_0W_1W_0W_1W_0W_1$;($R_1W_0W_1W_0W_1W_0$;)와 같은 번지증가순 MEs이다(이하의 MEs는 동일한 효과를 나타냄.) 이들 중 어떠한 MEs를 두 커플링 셀에 적용하여도 두 커플링 셀의 ↑ 수는 짝수번 발생하여 커플된 셀에 짝수번 영향을 주어 상태변화시키므로 고장이 검출되지 아니한다.

a.1.2) 두 개의 번지감소순 MEs로서 검출하려고 할 때

첫번째 ME에서 고장을 발생시키고, 두번째 ME에서 발생된 고장을 검출하려고 한다. 첫번째 ME는 (a.1.1)에서 나열한 종류의 번지감소순 MEs등인데, 이들중 어떠한 MEs를 적용시켜도 (a.1.1)의 경우와 마찬가지로 고장효과가 소멸되므로 두번째 ME에서 고장이 검출되지 아니한다.

a.1.3) 하나의 번지감소순 ME와 하나의 번지증가순 ME로서 검출하려고 할 때

첫번째 ME를 적용하면 (a.1.2)의 경우와 마찬가지로 고장효과가 소멸되고, 두번째 ME를 적용하면(a.1.1)의 경우와 마찬가지로 고장효과가 소멸되어 고장이 검출되지 아니한다.

셀순서가 i<j<k일 때의 고장을 검출하기 위한 MEs의 조합은 위에서 고려한 3가지의 경우 이외에는 없다. 따라서, 고장검출 가능한 MEs의 모든 조합에서 고장이 검출되지 못하므로 제시된 ii1 고장은 검출되지 아니한다.

a.2)~a.4) ii2, ii3 및 ii4 고장의 경우

각 경우에 대하여 (a.1)의 경우와 같은 방법으로 고장이 검출되지 아니한다.

b) ($\downarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$)고장과 ($\downarrow_j \Rightarrow \updownarrow_k$)고장이 연결되어 있는 경우, 즉, jj 고장의 경우

(a)의 경우와 같은 방법으로 모든 경우에 대해 고장이 검출되지 아니한다.

c) ($\updownarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k$)고장과 ($\updownarrow_j \Rightarrow \updownarrow_k$)고장이연결되어 있는 경우, 즉, kk 고장의 경우

(a)의 경우와 같은 방법으로 모든 경우에 대해 고장이 검출되지 아니한다. Q.E.D.

보조정리) 정리 5에 의해 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 1.653%이다.

증명) 정리 5에서 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 3종류가 있고, 각 종류의 고장은 4가지의 셀 순서에 대해 고장이 검출되지 않으므로, 모두 12가지 경우의 고장이 검출되지 아니한다. 따라서, 정리 5에 의해 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 차수 2의 연결된 2-CFs가 검출되지 않는 률은 12/726이므로 1.653%이다. Q. E. D.

정리 6) ($\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k$, $\downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k$)고장 K_i와 ($\updownarrow_j \Rightarrow \updownarrow_k$) 고장 K_j가 연결되어 있고, 셀순서가 i<j<k 또는 k<j<i일 때 차수 2의 연결된 2-CF는 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 검출되지 아니한다. Q. E. D.

증명) 가정된 고장에 대해 가능한 모든 MEs로서 검출되지 않는 것을 증명하면 된다.

a) 셀 순서가 $i<j<k$인 경우의 고장, 즉, fk1 고장의 경우

a.1) 하나의 번지증가순 ME로서 검출하려고 할 때

셀의 0(1) 상태에서 적용되는 MEs는 항상 $R_0W_1(R_1W_0)$로서 시작되므로, i 셀에 어떠한 번지증가순 ME를 적용시킨다 하더라도 고장 K_1가 $(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k, \downarrow_i \Rightarrow \downarrow_k)$ 고장이어서 모든 write에서 k 셀에 영향을 준다. 또한, 동일한 ME가 j 셀에도 적용되어 모든 write에서 k 셀에 영향을 주게 되므로, 결국 커플된 셀에 짝수번 영향을 주게되어 상태변화시키므로 고장 효과가 소멸되고, 고장은 검출되지 아니한다.

a.2) 두 개의 번지감소순 ME로서 고장 검출하려고 할 때

a.2.1) 하나의 read와 홀수개의 write로 첫번째 ME를 구성하는 경우

셀의 0(1) 상태에서 ME는 $R_0W_1(R_1W_0)$으로 시작되고 $W_1(W_0)$으로 끝난다. 이와같은 ME와 우선 k 셀에 수행되면 k 셀의 내용은 1(0) 상태로 된다. 동일한 ME를 j 셀에 적용시키면, 모든 write에서 k 셀에 영향을 주어 즉, 홀수번 상태를 변화시키므로, k 셀의 상태는 0(1) 상태가 되어 고장이 발생한다. 그러나, 동일한 ME를 i 셀에 적용시키면, 모든 write에서 k 셀에 영향을 줌으로서 k 셀의 상태는 1(0) 상태가 되어 고장효과가 소멸된다. 따라서, 두번째 ME를 적용할 때 고장은 검출되지 아니한다.

a.2.2) 하나의 read와 짝수개의 write로 첫번째 ME를 구성하는 경우

셀의 0(1) 상태에서 ME는 $R_0W_1(R_1W_0)$으로 시작되고 $W_0(W_1)$으로 끝난다. 이러한 ME를 우선 k 셀에 수행시키면 k 셀은 0(1) 상태로 된다. 동일한 ME를 j 셀에 적용시키면 모든 write에서 k 셀에 영향을 줌으로서 k 셀의 상태는 0(1) 상태가 되어 고장효과가 소멸된다. 또한, 동일한 ME를 i 셀에 수행시키면, 마찬가지로 모든 write에서 k 셀에 영향을 줌으로서 k 셀의 상태는 0(1) 상태가 되어 고장효과가 소멸된다. 따라서, 두번째 ME를 적용할 때, 고장은 검출되지 아니한다.

a.3) 하나의 번지감소순 ME와 하나의 번지증가순 ME로서 검출하려고 할 때

번지감소순 ME를 어떻게 구성하더라도 (a.2)에서와 같이 고장효과는 소멸되고, 또한 두번째의 번지증가순 ME를 어떻게 구성하더라도 (a.1)에서와 같이 고장효과는 소멸되므로 고장은 검출되지 아니한다.

따라서, 고장검출 가능한 MEs의 모든 조합에서 고장이 검출되지 못하므로 제시된 fk1 고장은 검출되지 아니한다.

b) 셀 순서가 $k<j<i$인 경우의 고장, 즉, fk4 고장의 경우

(a)과 같은 방법으로 고장이 검출되지 아니한다.

Q.E.D.

보조정리 1) $(\updownarrow_i \Rightarrow \updownarrow_k)$ 고장 K_i와 $(\uparrow_j \Rightarrow \uparrow_k, \downarrow_j \Rightarrow \downarrow_k)$ 고장 K_j가 연결되어 있고, 셀 순서가 $j<i<k$ 또는 $k<i<j$일 때 차수 2의 연결된 2-CFs는 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 검출되지 아니한다.

증명) 이와같은 경우의 고장은 정리 6의 i 셀과 j 셀의 그 역할이 바뀐 경우의 고장과 동일하다. 따라서, 정리 6의 증명방법과 동일하다. Q.E.D.

보조정리 2) 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 정리 6과 보조정리 1에 의해 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 0.551%이다.

증명) 정리 6에 의해 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 2가지가 있고, 보조정리 1에 의해 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 2가지가 있으므로, 모두 4가지의 고장이 검출되지 않는다. 따라서, 정리 5와 보조정리 1에 의해서 검출되지 않는 차수 2의 연결된 2-CFs는 4/726로서 0.551%이다. Q.E.D.

보조정리 3) 하나의 번지순서를 사용한 MT에서 검출할 수 없는 차수 2의 연결된 2-CFs는 2.204%이다.

증명) 정리 5의 보조정리와 정리 6의 보조정리 2에 의해 하나의 번지순서를 사용한 MT로서 검출할 수 없는 차수 2의 연결된 2-CFs는 모두 16가지이다. 따라서, 하나의 번지순서를 사용한 MT로서 검출할 수 없는 연결된 2-CFs는 16/726으로서 2.204%이다. Q.E.D.

2. 커플링고장 검출한계까지 검출하는 알고리듬

하나의 번지순서를 사용한 MT로서 검출할 수 없는 차수 2의 연결된 2-CFs는 두 커플링 셀이 연속하여 커플된 셀에 영향을 주는 경우이다. 따라서, 이러한 경우에 있어서 고장을 검출할 수 있는 MEs를 구하여 MT를 구성한다. 고장을 검출할 수 있는 MEs를 구할 때, 메모리 셀 어레이의 각 상태에서 고려해 주어야 하고 또한, 고장을 검출할 수 있는 MEs의 모든 조합에 대하여 고려해 주어야 한다.

셀순서가 $i<j<k$이고, $(\uparrow_i \Rightarrow \uparrow_k)$와 다른 하나의 CF가 연결되어 있을 경우의 고장을 검출할 수 있는 MEs를 표 5에 나타내었다. 하나의 번지감소순 ME와 하나의 번지증가순 ME의 조합으로서 고장을 검출할 수 있는 경우는 생략되었다. 이는 표 5에 나타나 있는 ME의 조합 두 가지에 의하여 포함되기 때문에 표시하지 않았다. 고장명칭은 VI장 1절에서 표기된 것을 따른다. 표 5에서 빈칸은 그 경우에 있어서 고장을 검출할 수 있는 MEs가 없다는 뜻이다.

표 5. $(\uparrow_i\Rightarrow\uparrow_k)$와 다른 하나의 CF가 연결되어 있고, $i<j<k$일 때의 고장을 검출할 수 있는 MEs 목록

Table 5. The list of MEs for detecting the linked CF which consists of a $(\uparrow_i\Rightarrow\uparrow_k)$ and another CF where $i<j<k$ in cell location.

CF	cell state 0		cell state 1	
NO.	A	DD	A	DD
aa1	$R_0W_1(m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;		$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ab1		$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0W_1(m)$;	$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ac1	$R_0W_1(m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;		$R_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ad1	$R_0W_1(m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0(m)$;	$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ae1	$R_0W_1(m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;		$R_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
af1	$R_0W_1(2m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0(2m)$;	$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ag1	$R_0W_1W_0(2m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0W_1(2m)$;	$R_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ah1		$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0(m)$;	$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ai1	$R_1W_1W_0W_1(4m(+1))$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0W_1(4m(+1))$;	$R_1W_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
aj1	$R_0W_1(4m(+3))$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0(4m(+1))$;	$R_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;
ak1	$R_0W_1W_0(2m)$;	$R_0W_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;	$R_1W_0(2m)$;	$R_1W_0(2m)$;$R_0(m)$;

Remark
1. A : a ME with ascending address
2. DD : a ME with descending address and a ME with descending address
3. m : 0 or the positive integer
4. (m) etc. : the number of transition write
5. 4m(+1) : 4m or 4m+1

발생가능한 차수 2의 연결된 2-CFs 모두의 각 셀 순서에서 표 5와 같이 MEs를 구성한다(표 5는 전체 목록의 1/44임). 이 목록은 너무 많은 양이므로 나머지에 대해서는 생략한다. 구성된 표에서 각 ME가 몇 개의 고장을 검출할 수 있는가를 조사한다. 조사한 바에 따르면, 많은 고장을 검출하는 MEs는 $R_0W_1(m)$;, $R_0W_1(2m)$;, $R_0W_1W_0(2m)$; 및 이와 대칭되는 ME 등이다. 이와같은 MEs를 적절히 배치하고, covering table 기법을 사용하여 MT를 구하면 다음과 같다. Covering table도 너무 많은 양이므로 생략한다.

$$Wx;\overline{RxWx'};\overline{Rx'WxWx'};\underline{Rx'WxWx'};\underline{Rx'Wx};\underline{RxWx'Wx};Rx;$$
(알고리듬 나-1)

$$Wx;\underline{RxWx'};\underline{Rx'WxWx'};\overline{Rx'WxWx'};\overline{Rx'Wx};\overline{RxWx'Wx};Rx;$$
(알고리듬 나-2)

$$Wx;\overline{RxWx'};\overline{Rx'WxWx'};Rx';\underline{Rx'WxWx'};\underline{Rx'Wx};\underline{RxWx'Wx};$$
(알고리듬 나-3)

$$Wx;\underline{RxWx'};\underline{Rx'WxWx'};Rx';\overline{Rx'WxWx'};\overline{Rx'Wx};\overline{RxWx'Wx};$$
(알고리듬 나-4)

$$Wx;\overline{RxWx'Wx};\overline{RxWx'};\overline{Rx'WxWx';Rx'};\underline{Rx'Wx};\underline{RxWx'Wx};$$
(알고리듬 나-5)

$$Wx;\underline{RxWx'Wx};\underline{RxWx'};\underline{Rx'WxWx'};Rx';\overline{Rx'Wx};\overline{RxWx'Wx};$$
(알고리듬 나-6)

위의 알고리듬 6가지를 "알고리듬 나"라 한다.

정리 7) "알고리듬 나"는 고착고장, 천이고장, 번지해독기 고장, 연결되지 않은 2-CFs 및 차수 2의 연결된 2-CFs의 97.796%를 검출한다. 셀을 read할 때 셀의 상태가 안정되어 있으면 연결되지 않은 CCF를 검출한다.

증명) "알고리듬 나"는 "알고리듬 가"를 포함하므로 고착고장, 천이고장, 번지해독기 고장 및 모든 연결되지 않은 2-CFs를 검출하고, read할 때 셀의 상태가 안정되어 있으므로 연결되지 않은 CCF를 검출한다. 또한, 표 5와 같이 작성된 목록에 나타나 있는 차수 2의 연결된 2-CFs 각각을 검출할 수 있는 MEs를 "알고리듬 나"가 포함하므로, CF 검출한계까지 연결된 2-CFs를 검출한다.

Q.E.D

"알고리듬 나"는 15N의 시간복잡도를 가지며, inversion CF 및 CCF를 고려하였을 뿐만 아니라 CF 검출한계까지 CF를 검출한다. CF 검출한계까지 CF를 검출하는 MT로서 시간복잡도가 15N을 초과하는 것은 무수히 많다.

3. 시뮬레이션 및 기존 알고리듬들과의 비교

Workstation인 SUN 4 SPARK system에서 각 알고리듬이 고장을 검출할 수 있는 정도를 시뮬레이션하였다.

표 6은 각 알고리듬이 차수 2의 연결된 2-CFs를 어느 정도 검출하는지 나타낸다. 표 6의 fault coverage는 알고리듬이 검출할 수 있는 차수 2의 연결된 2-CFs의 수이며, 괄호내의 수는 그 퍼센트를 표시하였다.

표 6. 차수 2의 연결된 2-CFs의 검출에 대한 시뮬레이션 결과

Table 6. The simulation results for the detection of linked 2-CFs with order 2.

Algorithm	Time complexity	Fault coverage for linked 2-CFs with 2
Algorithm A[4]	30N	710(97.796%)
TEST A [5]	15N	698(96.143%)
Procedure 1 [6]	37N	710(97.796%)
Algorithm NA	15N	710(97.796%)

Algorithm A, TEST A 및 Procedure 1은 inversion CFs 및 CCFs를 고려하지 않았으므로 "알고리듬 나"와 그 비교가 어려우나 CFs를 검출하는 알고리듬들이라는 측면에서의 비교는 의미가 있다.

차수 2의 연결된 2-CFs만을 검출한다는 측면에서 보면 "알고리듬 나"는 동일한 고장 검출능력을 가지는 알고리듬들에 비해 시간복잡도가 감소되었고, 동일한 시간복잡도를 가지는 알고리듬에 비해 고장 검출능력이 증가하였다. 또한, "알고리듬 나"는 표 6의 세 알고리듬이 검출하는 고장 모두를 검출하고, 세 알고리듬에서 고려되지 않았던 고장들도 검출하므로 세 알고리듬에 비해 많이 개선되었다.

표 7은 기존의 알고리듬들과 제안된 알고리듬들의 시간복잡도와 고장검출능력을 비교한 것이다.

표 7에서 "알고리듬 가"는 연결되지 않은 2-CFs를 검출하는 알고리듬들 중에서 가장 시간복잡도가 적으며 "알고리듬 나"는 하나의 번지순서를 사용한 MT로서 검출할 수 있는 CFs의 검출한계까지 검출하는 알고리듬들 중에서 가장 시간복잡도가 적다. 또한, 다른 알고리듬들에서 고려되지 않았던 inversion CFs 및 CCFs에 대하여 고려하였으므로 고장 검출능력이 증가하였다.

표 7. 알고리듬들의 비교

Table 7. The comparision of algorithms.

Algorithms	Time comp.	Fault coverage
MTS+	5N 2	All SAFs (Arbitrary wired logic)
TEST A in [5]	15N	SAFs, TFs, Unlinked 2-CFs 96.143% linked 2-CFs with order 2 (No, multiple access faults)
Algorithm A in [4]	30N	SAFs, TFs, AFs, Unlinked 2 CFs, 97.796% linked 2-CFs with order 2
Procedure 1 in [6]	37N	SAFs, TFs, AFs, Unlinked 2 CFs, 97.796% linked 2-CFs with order 2
Algorithm GA	10N	SAFs, TFs, AFs, Unlinked 2 CFs, 92% linked 2-CFs with order 2 (Including inversion CFs and CCFs)
Algorithm NA	15N	SAFs, TFs, AFs, Unlinked 2 CFs, 97.796% linked 2-CFs with order 2 (Including inversion CFs and CCFs)

V. 결 론

본 연구에서는 반도체 메모리의 커플링고장을 중심으로 상세히 분류하여 모델화하였다. Inversion 커플링 고장을 모델에 포함시켰다. 연쇄 커플링고장을 새로이 도입하고, 정의하였다. 연결된 커플링고장에 대해서 그 차수를 정의하여 연결된 고장의 개념을 명확히 하였다.

연결되지 않은 커플링고장을 검출하기 위하여 각 커플링고장을 검출할 수 있는 최소의 march elements를 구하였다. 구해진 최소의 march element를 covering table 기법에 적용시켜 "알고리듬 가"를 구성하고, 이를 제안하였다. "알고리듬 가"는 시간복잡도가 10N으로서 연결되지 않은 커플링고장을 검출하는 알고리듬들에 비해 시간복잡도가 감소되었다. 또한, "알고리듬 가"는 inversion 커플링고장 및 연쇄 커플링고장이 고장모델에 포함되어 고장 검출능력이 증가한다. "알고리듬 가"는 고착고장, 천이고장, 번지해독기 고장 및 연결되지 않은 2-커플링고장을 검출한다. 또한, 셀의 상태를 read할 때 셀의 상태가 안정되어 있으면 연결되지 않은 연쇄 커플링고장도 검출한다.

하나의 번지순서를 사용한 march test로서 검출할 수 없는 연결된 커플링고장등이 있다. 하나의 번지순서를 사용한 march test는 차수 2의 연결된 2-커플링고장(726 가지) 중에서 16가지의 고장을 검출하지 못하여 하나의 번지순서를 사용한 march test가 검출할 수 있는

차수 2의 연결된 커플링고장의 한계가 97.796%라는 것을 입증하였다.

차수 2의 연결된 2-커플링고장을 검출하기 위하여 발생 가능한 차수 2의 연결된 2-커플링고장의 각각을 검출할 수 있는 march element를 구하였다. 이 march element들을 covering table에 적용시켜 "알고리듬 나"를 구성하고, 이를 제안하였다. "알고리듬 나"는 15N의 시간복잡도를 가지고, 하나의 번지순서를 사용한 march test가 검출할 수 있는 커플링고장 검출한계까지 검출한다. "알고리듬 나"는 동일한 시간복잡도를 가지는 알고리듬들에 비해 고장 검출능력이 증가하였고, 커플링고장 검출한계까지 검출할 수 있는 알고리듬들에 비해 시간복잡도가 감소되었다. "알고리듬 나"는 다른 알고리듬들에서 고려되지 않았던 inversion 커플링고장 및 연쇄 커플링 고장이 고장모델에 포함되어 고장 검출능력이 증가한다.

參 考 文 獻

[1] John Knaizuk, JR., and C.R.P. Hartmann, "An algorithm for testing random access memories", *IEEE Trans. on Computers,* vol. C-26, pp, 414-416, Apr. 1977.

[2] John Knaizuk, JR., and C.R.P. Hartmann, "An optimal algorithm for testing stuck-at faults in random access memories", *IEEE Trans. on Computers,* vol. c-26, no. 11, pp. 1141-1144, Nov. 1977.

[3] Ravindra Nair, "Comments on "An optimal algorithm for testing stuck-at faults in random access memories", *IEEE Trans. on Computers,* vol. C-28, no. 3, pp. 258-261, Mar. 1979.

[4] Ravindra Nair, S.M. Thatte, and J.A. Abraham, "Efficient algorithm for testing semiconductor random-access memories," *IEEE Trans. on Computers,* vol. C-27, no. 6, pp. 572-576, June, 1978.

[5] D.S. Suk and S.M. Reddy, "A march test for functional faults in semiconductor random access memories," *IEEE Trans. on Computers,* vol. C-30, no. 12, pp. 982-985, Dec. 1981.

[6] C.A. Papachristou, and N.B. Sahgal, "An improved method for detecting functional faults in semiconductor random access memories," *IEEE Trans. on Computers,* vol. C-34, no.2, pp. 110-116, Feb. 1985.

[7] M.S. Abadir and H.K. Reghbati, "Functional testing of semiconductor random access memories," Computing Surveys, vol. 15, no. 3, pp. 175-198, Sept. 1983.

[8] A.J. Van De Goor and C.A. Verruijt, "An overview of deterministic funcional RAM chip testing", ACM Computing Surveys, vol. 22, no. 1, pp. 5-33, Mar. 1990.

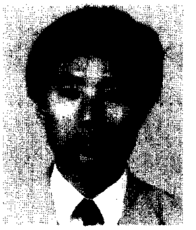
[9] R. David. A. Fuentes, and B. Courtois, "Random pattern testing versus deterministic testing of RAM", *IEEE Trans. on Computers,* vol. 38, no. 5, pp. 637-650, May 1989.

[10] J. Savir, W.H. McAnney, and S.R. Vecchio, "Testing for coupled cells in random-access memories", *IEEE Trans. on Computers,* vol. 40, no. 10, pp. 1177-1180, Oct. 1991.

著 者 紹 介

余 定 模(正會員)

1956年 5月 4日生. 1980年 2月 동아대학교 전자공학과 졸업(학사) 1982年 2月 부산대학교 대학원 전자공학과 수료(공학석사). 1990年 2月 울산대학교 대학원 전자 및 전자계산기공학과 박사과정 수료 1986年 8月～현재 부산공업대학 전자계산학과 조교수. 주요관심분야는 VSLI/ULSI 테스트 및 설계, 초고집적 메모리의 Test 및 Testable design, 컴퓨터구조 및 마이크로세서 등임.



趙 相 福(正會員)

1955年 6月 10日生. 1979年 2月 한양대학교 전자공학과 졸업. 1991年 2月 한양대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1985年 2月 한양대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1986年 3月～현재 울산대학교 전자공학과부교수. 주관심분야는 VLSI/ULSI 테스트 및 설계, 초고집적 RAM의 Test 및 Testable Design, ASIC Design, VLSI CAD tool 개발 등임.