

MROZEK Ireneusz¹

EFEKTYWNE WYKRYWANIE USZKODZEŃ PSF OPARTE O ZMIANĘ ADRESACJI W ITERACYJNYM PROCESIE TESTOWANIA PAMIĘCI RAM

Artykuł przedstawia propozycję zastosowania testów typu March do efektywnego wykrywania uszkodzeń złożonych (uszkodzeń wiążących zależnością wiele komórek pamięci) występujących w pamięci RAM. Proponowana idea pozostawia niezmienną wartość w testowanym układzie po zakończeniu sesji testowej. Może zatem być używana do cyklicznego testowania pamięci podczas normalnej pracy urządzeń elektronicznych zawierających pamięć RAM. Przedstawiana technika pozwala z bardzo wysokim prawdopodobieństwem wykryć wszystkie istniejące w pamięci uszkodzenia złożone. Zastosowanie w proponowanej idei testów typu March gwarantuje również wykrycie wszystkich uszkodzeń prostych znajdujących się w pamięci.

EFFECTIVE PSF DETECTION IN RAM BASED ON ADDRESSING CHANGING IN ITERATIVE APPLICATION OF MARCH TESTS

This paper develops the new solution for memory testing based on transparent memory tests in terms of pattern sensitive faults detection. Previous research has outlined that the only march tests can be in use now to test modern memory chips. Their transparent versions are very efficient for the simple fault diagnoses. The solution has been proposed in this paper dealing with the extension of known algorithms for the case of pattern sensitive faults. Using march test according to the proposed technique it is possible to detect pattern sensitive memory faults with a very high probability.

1. WSTĘP

Ze względu na liczbę komórek powiązanych uszkodzeniem, uszkodzenia pamięci można podzielić na uszkodzenia związane z jedną komórką pamięci (np. *Stuck-at Fault*) i uszkodzenia związane z wieloma komórkami pamięci (np. *Coupling Fault*, *Pattern Sensitive Fault*). Ogólnym przypadkiem uszkodzenia należącego do grupy drugiej jest uszkodzenie typu *Pattern Sensitive Fault*, gdzie zależnością powiązane jest n komórek pamięci. Wartość (lub możliwość zmiany wartości) jednej z tych komórek (komórki bazowej) jest zależna od wartości i ich zmian w $n-1$ pozostałych komórkach powiązanych tym uszkodzeniem. Uszkodzenia PSF można podzielić na następujące grupy:

¹Państwowa Wyższa Szkoła Informatyki i Przedsiębiorczości w Łomży, Akademicka 14 , 18-400 Łomża, imrozek@pwsip.edu.pl

- *Active Pattern Sensitive Fault (APSF)*. Wartość komórki bazowej zmienia się w zależności od wartości i ich zmian w komórkach powiązanych tym uszkodzeniem.
- *Passive Pattern Sensitive Fault (PPSF)*. Przy określonej wartości komórek powiązanych uszkodzeniem *PPSF* niemożliwa jest zmiana wartości komórki bazowej.
- *Static Pattern Sensitive Fault (SPSF)*. Określone wartości komórek powiązanych uszkodzeniem *SPSF* wymuszają określoną wartość komórki bazowej.

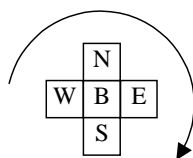
Najczęstszą przyczyną występowania uszkodzenia *PSF* jest wpływ na siebie fizycznie sąsiadujących ze sobą komórek pamięci. Z uwagi na fakt, iż fizyczne rozmieszczenie komórek jest różne od logicznego rozmieszczenia widzianego przez użytkownika, do efektywnego testowania uszkodzeń *PSF* niezbędna jest informacja pozwalająca określić fizyczne położenie komórki na podstawie jej adresu logicznego (ang. *scrambling information*). Jednak bardzo rzadko informacja ta jest publikowana przez producenta. Dlatego nie zawsze możliwe jest używanie testów wykorzystujących powyższą informację. W artykule zaproponowana zostanie technika pozwalająca na efektywne użycie standardowych testów pamięci do wykrywania uszkodzeń typu *Pattern Sensitive Fault* w przypadku, gdy nie jest znana informacja o fizycznym rozmieszczeniu komórek w pamięci.

Najbardziej popularne podejście do funkcjonalnego testowania pamięci RAM oparte jest na testach krokowych (ang. *march tests*) charakteryzujących się niską złożonością $O(N)$ oraz wysokim pokryciem uszkodzeń [2]. W artykule uwaga zostanie skupiona na wykorzystaniu w procesie testowania pamięci RAM transparentnych wersji testów krokowych. (ang. *transparent march tests*) [3]. Charakteryzują się one wysokim pokryciem uszkodzeń, akceptowalną długością testu oraz przezroczystością wobec testowanej pamięci polegającą na pozostawieniu (po zakończeniu procesu testowania) jej zawartości w stanie niezmienionym w stosunku do zawartości z momentu bezpośrednio poprzedzającego rozpoczęcie testu. Ma to szczególne znaczenie w wypadku testów periodycznych realizowanych w czasie normalnej pracy urządzenia. Transparentne wersje testów krokowych można otrzymać poprzez nieskomplikowaną transformację testów klasycznych [5]. Wszystko to sprawia, iż również w wypadku testowania transparentnego BIST (ang. *built-in self-test*), w sposób szczególny wykorzystywanego do testowania modułów pamięci RAM [6], testy krokowe odgrywają kluczową rolę [3,4].

2. WPŁYW ZMIAN SPOSOBU ADRESOWANIA W TESTACH TYPU MARCH NA WYKRYWALNOŚĆ USZKODZEŃ PSF

W [2] przedstawiony został wpływ losowych zmian zawartości pamięci na prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzeń złożonych przez testy krokowe. W rozdziale bieżącym rozważony zostanie wpływ sposobu adresowania w testach krokowych na wykrywalność istniejących w pamięci uszkodzeń. Jako przykład rozważona zostanie sytuacja przedstawiona na rys. 1 w której na stan komórki bazowej *B* mają wpływ cztery komórki wiążące *W N E S*, a sposób ich adresowania ustalony jest zgodnie z ruchem wskazówek zegara począwszy od komórki pamięci *W*. Przy takim założeniu w testach typu

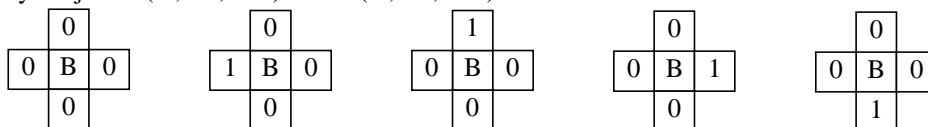
March w adresowaniu oznaczonym przez \uparrow komórki pamięci będą odczytywane (zapisywane) w kolejności $W N E S$, zaś przy adresowaniu oznaczonym przez symbol \downarrow kolejność oddziaływania na poszczególne komórki odwróci się i będą odczytywane (zapisywane) w kolejności $S E N W$.



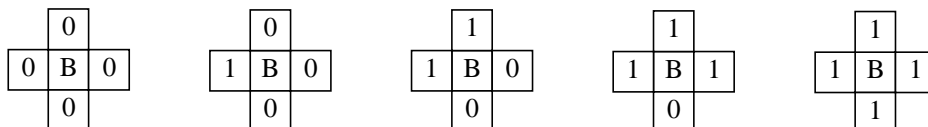
Rys.1. Przykładowy kierunek adresowania komórek powiązanych uszkodzeniem złożonym.

Polecenia składające się na dowolną fazę testu typu March mogą wielokrotnie zmieniać stan komórki na przeciwny w stosunku do stanu początkowego, a następnie przywracać stan początkowy. Po zakończeniu dowolnej fazy testu, stan komórki pamięci może więc nie ulec zmianie lub ulec zmianie przybierając wartość przeciwną do wartości początkowej. Z punktu widzenia określenia możliwych do uzyskania stanów w grupie komórek podczas realizacji dowolnej fazy testu typu March, należy rozważyć następujące sytuacje:

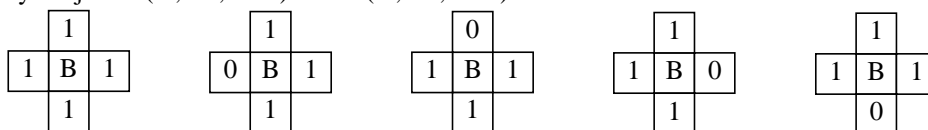
Sytuacja 1 \uparrow (ra, wā,....ra) lub \downarrow (ra, wā,....ra):



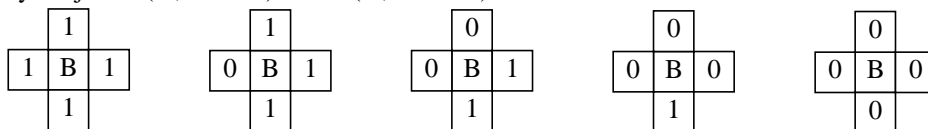
Sytuacja 2 \uparrow (ra, wā rā) lub \downarrow (rā,wa.... ra) :



Sytuacja 3 \uparrow (rā, wa,.... rā) lub \downarrow (rā, wa,.... rā):

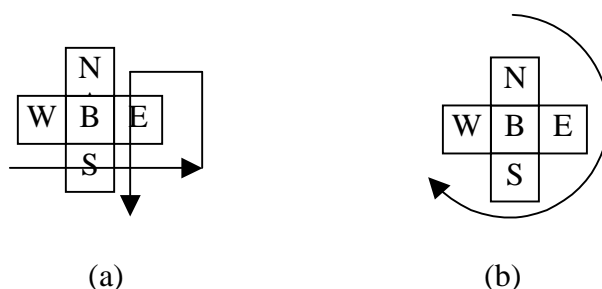


Sytuacja 4 \uparrow (rā,wa.... ra) lub \downarrow (ra,wā rā)



W rozpatrywanym przykładzie zbiór wszystkich różnych możliwych do uzyskania stanów w komórkach powiązanych wymuszonych przez test typu March jest równy: $S_1^*(W,N,E,S) = \{0000, 1000, 0100, 0010, 0001, 1100, 1110, 1111, 0111, 1011, 1101, 0011\}$, podczas gdy

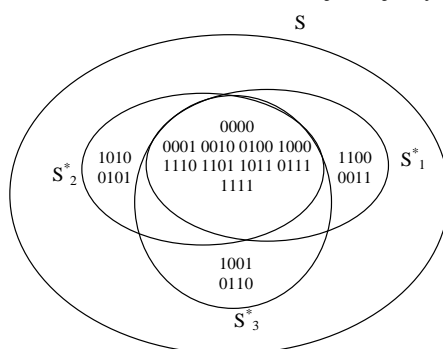
zbiór wszystkich możliwych stanów w rozpatrywanych komórkach jest równy: $S(W,N,E,S) = (0000, 0001, 0010, 0011, 0100, \mathbf{0101}, \mathbf{0110}, 0111, 1000, \mathbf{1001}, \mathbf{1010}, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111)$. Pogrubioną czcionką w zbiorze S oznaczone są te kombinacje stanów komórek wiążących, których nie da się otrzymać przy założonym sposobie adresowania i przyjętych wartościach początkowych. Rozważona zostanie teraz zmiana sposobu adresowania komórek wiążących na zgodny z rys. 2.



Rys.2. Przykład zmienionych sposobów adresowania (a) W E N S, (b) N E S W.

Przy ustalonym sposobie adresowania zgodnym z rys. 2a w testach typu March w fazach w których kolejność adresowania oznaczona jest jako \uparrow rozpatrywane komórki pamięci będą odczytywane (zapisywane) w kolejności W E N S, zaś przy adresowaniu oznaczonym przez symbol \downarrow w kolejności S N E W. Dla tak przyjętego sposobu adresowania zbiór wszystkich różnych możliwych do uzyskania stanów w komórkach wiążących wymuszonych przez test typu March jest równy: $S_2^*(W,N,E,S) = \{0000, 1000, 0010, 0100, 0001, 1010, 1110, 1111, 0111, 1011, 1101, 0101\}$. Zbiór wszystkich możliwych do uzyskania stanów w komórkach wiążących pozostaje niezmienny. Tak jak poprzednio drukiem pogrubionym zostały zaznaczone kombinacje, które nie są możliwe do uzyskania przy tak założonym sposobie adresowania i przyjętych wartościach początkowych: $S(W,N,E,S) = \{0000, 0001, 0010, \mathbf{0011}, 0100, 0101, \mathbf{0110}, 0111, 1000, \mathbf{1001}, 1010, 1011, \mathbf{1100}, 1101, 1110, 1111\}$. Przy ustalonym sposobie adresowania zgodnym z rys. 2b w testach typu March w fazach w których kolejność adresowania oznaczona jest jako \uparrow rozpatrywane komórki pamięci będą odczytywane (zapisywane) w kolejności N E S W, zaś przy adresowaniu oznaczonym przez symbol \downarrow w kolejności W S E N. Dla tak przyjętego sposobu adresowania zbiór wszystkich różnych możliwych do uzyskania stanów w komórkach wiążących wymuszonych przez testu typu March jest równy: $S_3^*(W,N,E,S) = \{0000, 0100, 0010, 0001, 1000, 1111, 1011, 1101, 1110, 0111, 0110, 1001\}$. Zbiór wszystkich możliwych do uzyskania stanów w komórkach wiążących pozostaje niezmienny. Tak jak poprzednio drukiem pogrubionym zostały zaznaczone kombinacje, które nie są możliwe do uzyskania przy tak założonym sposobie adresowania i przyjętych wartościach początkowych: $S(W,N,E,S) = \{0000, 0001, 0010, \mathbf{0011}, 0100, \mathbf{0101}, 0110, 0111, 1000, 1001, \mathbf{1010}, 1011, \mathbf{1100}, 1101, 1110, 1111\}$.

Z otrzymanych wyników widać, iż sposób adresowania nie ma wpływu na liczbę możliwych do uzyskania stanów w komórkach powiązanych. Należy jednak zauważyć, iż przy zmianie sposobu adresowania zmianie ulegają możliwe do uzyskania z pomocą testu stany w komórkach wiążących. Nie zmieniając zawartości pamięci, a jedynie sposób adresowania, możliwe jest osiągnięcie wszystkich stanów w jakich może znajdować się dana grupa komórek wiążących. Dla czterech komórek wiążących przedstawione powyżej trzy sposoby adresowania umożliwiają osiągnięcie wszystkich stanów w tych komórkach. Ilustruje to rys. 3. Przy tak dobranych sposobach adresowania możliwe jest więc wykrycie wszystkich uszkodzeń pasywnych i statycznych występujących w grupie komórek w której komórką bazową jest komórka *B* zaś komórkami wiążącymi komórki *WNE S*. Dodatkowo po krótkiej analizie można zauważyć, iż możliwe jest dobranie tak sposobów adresowania, aby osiągnięte zostały również wzorce niezbędne do wykrycia uszkodzenia aktywnego, a więc uszkodzenia w którym wartość komórki bazowej zależna jest zarówno od wartości komórek wiążących jak również od zmian wartości w jednej z tych komórek.



Rys.3. Wygenerowane wzorce przy różnych sposobach adresowania[5].

Powyższe rozważania pozwalają stwierdzić, iż dla dowolnej grupy komórek pamięci istnieje sposób adresowania testu typu March, który pozwoli, przy zadanych wartościach początkowych, osiągnąć dowolną kombinację stanów w tych komórkach pozwalającą uaktywnić uszkodzenia pasywne, statyczne jak również uszkodzenia aktywne. W związku z faktem, iż wszystkie uszkodzenia proste (np. *SAF*, *CF*, *TF*), można traktować jako podtypy uszkodzeń złożonych, zatem zmiany sposobu adresowania pamięci, podczas kolejnych realizacji zadanego testu krokowego, pozwalają wykryć wszystkie uszkodzenia znajdujące się w testowanej pamięci. Prawdopodobieństwo wykrycia tych uszkodzeń zależne jest od liczby iteracji testu w których zmieniono sposób adresowania (zakładając niezmienną początkową zawartość pamięci).

3. WYNIKI

Oznaczając przez P prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia przez jedną iterację testu, prawdopodobieństwo nie wykrycia tego uszkodzenia przez tę iterację jest równe:

$$P^* = (1 - P) \quad (1)$$

Po dwóch iteracjach prawdopodobieństwo nie wykrycia uszkodzenia jest równe:

$$P_2^* = (1 - P)(1 - P), \quad (2)$$

z czego wynika, iż prawdopodobieństwo jego wykrycia po dwóch iteracjach można zapisać jako:

$$P_2 = 1 - P_2^* = 1 - (1-P)(1-P) = 1 - (1-P)^2 \quad (3)$$

Uogólniając powyższe rozważania można stwierdzić, iż prawdopodobieństwo wykrycia danego uszkodzenia po n iteracjach jest równe:

$$P_n = 1 - (1-P)^n \quad (4)$$

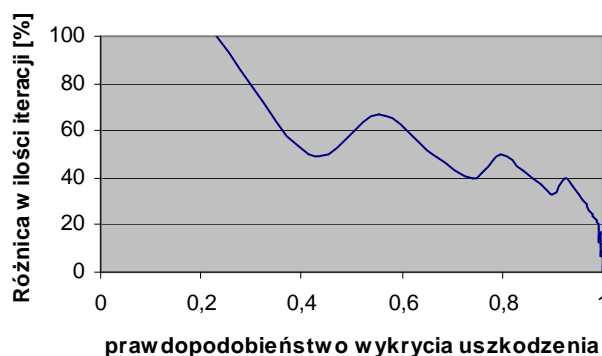
Tabela 1 przedstawia wyliczone wartości dla uszkodzeń wiążących 3, 5 i 9 komórek pamięci oraz testu March LA.

Tab. 1. Liczba iteracji niezbędna do osiągnięcia zadanego prawdopodobieństwa wykrywania uszkodzeń przez test March LA

Prawd	APSF3	SPSF3	PPSF3	APSF5	SPSF5	PPSF5	APSF9	SPSF9	PPSF9
0,75000	3	1	2	14	5	11	267	54	183
0,90000	5	2	3	24	8	18	443	90	303
0,95000	6	3	4	31	10	23	577	117	395
0,99000	10	4	7	48	16	35	887	179	607
0,99900	15	6	10	72	23	53	1330	269	910
0,99990	20	8	13	96	31	70	1773	358	1214
0,99999	25	11	17	120	39	88	2217	448	1517

Z przedstawionych wyliczeń wynika, iż stosunkowo niewielka liczba iteracji umożliwia osiągnięcie bardzo wysokiego prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzeń złożonych. Należy podkreślić fakt, iż w testach realizowanych według proponowanej idei nie jest konieczna znajomość fizycznego rozmieszczenia komórek testowanego układu pamięci. Na rys. 4 przedstawiona jest różnica procentowa pomiędzy wartościami otrzymanymi z obliczeń i z symulacji dla uszkodzenia ASPF5 i testu MARCH LA. Stosunkowa duża różnica przy niskich prawdopodobieństwach wynika z faktu zaokrąglania liczby iteracji w górę. Przykładowo, jeżeli dla zadanego prawdopodobieństwa otrzymano z symulacji liczbę iteracji równą 1 zaś na podstawie wyliczeń otrzymana została wartość 1.1, wtedy wartość otrzymana z wyliczeń była zaokrąglana w górę do pełnej liczby iteracji. W rozpatrywanym

przypadku wartość 1.1 zostanie zaokrąglona do wartości 2. Jest to powodem powstania różnicy pomiędzy wartościami wyliczonymi, a otrzymanymi z symulacji równej 100%. Na wykresie zaobserwować jednak można, iż różnica pomiędzy wartością wyliczoną a otrzymaną z symulacji maleje w miarę zwiększania się liczby iteracji. Wyniki symulacji są więc potwierdzeniem przedstawionych wcześniej rozważań teoretycznych.



Rys.4. Różnica pomiędzy wartościami obliczonymi a wartościami otrzymanymi drogą symulacji.

4. WNIOSKI

Zaprezentowana idea pozwala stwierdzić, iż testy typu March mogą być skuteczne również w odniesieniu do uszkodzeń typu *Pattern Sensitive Faults*. Przy losowych zmianach sposobu adresowania w używanym teście, bardzo szybko osiąga się prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzeń złożonych rzędu 0,99. Należy przypomnieć, iż obecnie używane testy typu March wykrywają wszystkie uszkodzenia proste (np. *SAF*, *TF*, *CF*). Tak więc proponowana idea umożliwi wykrycie wszystkich uszkodzeń prostych, jak również osiągnięcie bardzo wysokiego prawdopodobieństwa wykrycia uszkodzeń złożonych. Należy podkreślić fakt, iż prezentowana technika nie wymaga znajomości fizycznego rozkładu komórek pamięci. Może zatem być stosowana wszędzie tam, gdzie informacja ta nie jest dostępna.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Cheng K.L., WU C.W. *Neighborhood Pattern-Sensitive Fault Testing for Semiconductor Memories*, proc. VLSI Design/CAD Symp., Pingtung Aug. 2000, s. 401-404
- [2] Mrozek I. *Zastosowanie techniki symetrycznych testów pamięci do efektywnego wykrywania uszkodzeń typu Pattern Sensitive Faults w pamięci RAM*, „II Sympozjum Modelowanie i Symulacja Komputerowa w Technice” - Wyższa Szkoła Informatyki w Łodzi, Łódź 2003, s.137-140

-
- [3] Nicolaidis M. *Transparent BIST for RAMs*, Proc. IEEE Int. Test Conf., Baltimore, MD, Oct. 1992, pp. 598-607
 - [4] Van De Goor A.J *Testing semiconductor memories, theory and practice*, John Wiley & Sons 1991, ISBN 0 471 92586 1
 - [5] Mrozek I, Yarmolik, V.N.: *Transparentne testowanie pamięci RAM oparte na charakterystyce adresowej*, Elektronika, R.51, nr 9, s. 161-163, 2010
 - [6] Sosnowski, J., Tupaj, L.: *CPU Testability in Embedded Systems*, In Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Electronic Design, Test & Applications, DELTA 2010, pp 108-112, 2010