

ビアオープン故障を考慮した 重み付き故障カバレッジに関する一考察

Note on Weighted Fault Coverage Including Via Open Fault

小林 泰生[†]
Yasuki Kobayashi

岩崎 一彦[†]
Kazuhiko Iwasaki

1 まえがき

VLSI チップの市場不良率低減を目的として、レイアウト情報に基づく重み付き故障カバレッジ手法が提案されている。従来は、配線のブリッジ故障とオープン故障を対象故障としていたが、文献 [1] ではビアオープン故障も対象故障に含めた。

しかし、上記文献ではビアオープン故障のモデルの吟味が十分とは言えなかった。また、ブリッジ故障を検出するテストパターンでほとんどのオープン故障が検出できることが知られていたが、残存するオープン故障を考慮したテストパターン圧縮法とはなっていなかった。

2 ビアオープン故障モデル

ブリッジ故障、オープン故障、ビアオープン故障を対象故障とすると、テストパターン \mathbf{T} に対する重み付き故障カバレッジ $WFC(\mathbf{T})$ は以下の式で表される。

$$WFC(\mathbf{T}) = \alpha WFC(\mathbf{T})_{br} + \beta WFC(\mathbf{T})_{op} + \gamma WFC(\mathbf{T})_{via} \quad (1)$$

ここで、 α 、 β および γ は、それぞれブリッジ故障、オープン故障、ビアオープン故障が重み付き故障カバレッジに与える影響の割合を示し、半導体プロセスが成熟すると $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ に近づくと言われている。

図 1 にビアの構造を示す。ダブルビアの両方に故障が生じることは稀なので、本研究ではシングルビア（以下ビア）に生じる故障のみを対象とする。生じる欠陥は図 1 で示されるように、

- (a) 貫通部分に生じるオープン欠陥
 - (b) 金属配線との接続部分に生じるオープン欠陥
- が考えられる。それぞれのオープン欠陥は 0 縮退故障または 1 縮退故障を生じるもととする。ベンチマーク回路におけるビアの分布は文献 [1] を参照されたい。

テストパターン \mathbf{T} でビア v_i に生じた 0 縮退故障と 1 縮退故障の両方を検出できるとき $D(v_i, \mathbf{T}) = 1.0$ 、いずれか一方のみを検出できるとき $D(v_i, \mathbf{T}) = 0.5$ 、どちらも検出できないとき $D(v_i, \mathbf{T}) = 0$ と表すことにする。また、ビアの総数を n と表す。

ビアの貫通部に生じたビアオープン欠陥に対する重み付き故障カバレッジ $WFC_{via}(\mathbf{T})$ は、ビアの合計数が n 個、このうちテストパターン \mathbf{T} で検出されるクリティカルエリアの合計は $\sum_{i=1}^n D(v_i, \mathbf{T})$ なので、重み付き故障カバレッジ $WFC_{via}(\mathbf{T})$ は次式で表される。

[†] 首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

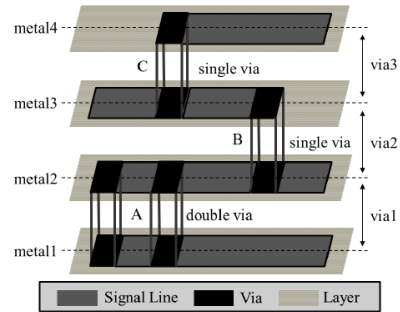


図 1 ビアの構造
Fig. 1 Via Structure.

$$WFC_{via}(\mathbf{T}) = \frac{\sum_{i=1}^n D(v_i, \mathbf{T})}{n} \quad (2)$$

一方、図 2 で示されるように、ビアの上下両端部分の金属層にオープン欠陥が生じる可能性も考えられる。この場合、例えば、ビアの一片の長さを $d/2$ 、非導電性異物の大きさを一辺 d の正方形とすると、ビアに対するクリティカルエリアは $A_{via} = (d/2)^2$ と表される。

クリティカルエリアの合計は $A_{via} \times n$ であり、このうちテストパターン \mathbf{T} で検出されるクリティカルエリアの合計は $\sum_{i=1}^n A_{via} \times D(v_i, \mathbf{T})$ なので、重み付き故障カバレッジ $WFC_{via}(\mathbf{T})$ は次式で表される。

$$WFC_{via}(\mathbf{T}) = \frac{\sum_{i=1}^n A_{via} \times D(v_i, \mathbf{T})}{A_{via} \times n} = \frac{\sum_{i=1}^n D(v_i, \mathbf{T})}{n} \quad (3)$$

式 (2) および式 (3) は同一であり、ビアのオープン故障として前記 (a), (b) どちらの考え方に基づいても、重み付き故障カバレッジ $WFC_{via}(\mathbf{T})$ は同一の式として表現される。物理的欠陥メカニズムを考えると、故障モデル (a) の方がより現実的と思われる。

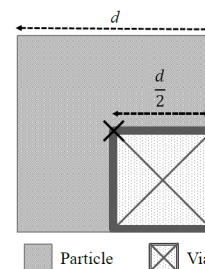


図 2 ビア金属層に生じるクリティカルエリア
Fig. 2 Critical area for a via metal layer.

表1 未検出オープン故障数とテストパターン数
Table 1 Undetected open faults and the number of test patterns.

Circuit	$ \mathbf{F}_{ud_op} $	$ \mathbf{T}_{ud_op} $
LN45-s1423a	1	1
LN45-s1488	27	16
LN45-s9234a	1	1
LN45-s15850a	4	2

3 テストパターン生成/圧縮フロー

重み付き故障カバレッジを高めるためには、ブリッジ故障テストパターン \mathbf{T}_{br} で検出できないオープン故障 \mathbf{F}_{ud_op} を検出する必要がある。すなわち、 \mathbf{F}_{ud_op} を検出するテストパターン \mathbf{T}_{ud_op} を追加する必要がある。

文献 [1] で示した 14 個のベンチマーク回路のうち、4 個の回路で \mathbf{T}_{br} で検出できないオープン故障が 1 個以上存在した。表 1 に、ベンチマーク回路名、オープン故障数 $|\mathbf{F}_{ud_op}|$ 、テストパターン数 $|\mathbf{T}_{ud_op}|$ を示す。LN45-s1423a, 同 s1488, 同 s9234a, 同 s15850a に対し、 $|\mathbf{F}_{ud_op}|$ はそれぞれ、1 個, 27 個, 1 個, 4 個であり、 $|\mathbf{T}_{ud_op}|$ はそれぞれ、1 個, 16 個, 1 個, 2 個であった。

図 3 にビアオープン故障を考慮したテストパターンの生成と圧縮のフローを示す。文献 [1] では \mathbf{T}_{ud_op} をステップ 4 の後で追加していたが、本稿ではステップ 2 で $\mathbf{T}_{br} + \mathbf{T}_{ud_op}$ とした。これにより、表 1 で示した \mathbf{T}_{ud_op} もステップ 3 およびステップ 4 で圧縮される可能性があり、テストパターン数は同一またはより小さくなることを期待される。

図 3 で示したフローチャートの実行結果を表 2 に示す。回路 Circuit に対し、テストパターン $\mathbf{T}_{br} + \mathbf{T}_{ud_op}$ で全てのブリッジ故障、オープン故障、ビアオープン故障が検出できる。このうち、 \mathbf{T}_{via} によって全てのビアオープン故障が検出される。 $\mathbf{T}_{via} \subseteq \mathbf{T}_{br} + \mathbf{T}_{ud_op}$ である。列 $|\mathbf{T}_{via}|$ の上段はグリーディ法 ($O(n^2)$) を用いた場合であり、下段は順逆シミュレーション法 ($O(n)$) を用いた場合である。更に、 \mathbf{T}_{via} で検出できないオープン故障を検出するために \mathbf{T}_{rem} が印加される。列 $|\mathbf{T}_{rem}|$ の

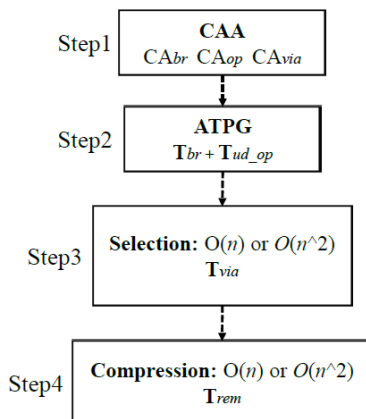


図 3 テストパターン生成/圧縮フローチャート
Fig. 3 Flowchart for test pattern generation and compression.

表 2 提案手法を用いたテストパターン数
Table 2 The number of test patterns using the proposed technique

Circuit	$ \mathbf{T}_{br} + \mathbf{T}_{ud_op} $	$ \mathbf{T}_{via} $	$ \mathbf{T}_{rem} $	Total	Ref[1]	Algorithm	
LN45-s1423a	68	11	50	61	62	greedy	
		15	49	64	65	w{1}	
			46	61	62	w{16}	
LN45-s1488	169	41	75	116	128	greedy	
		63	71	134	143	w{1}	
			69	132	140	w{16}	
LN45-s9234a	277	81	66	175	241	241	greedy
			174	255	255	w{1}	
			170	251	251	w{16}	
LN45-s15850a	222	73	166	247	247	w{32}	
			65	130	195	195	greedy
			132	205	205	w{1}	
			130	203	203	w{16}	
			127	200	201	w{32}	

上段はグリーディ法を用いた場合であり、下段の 3 個はウィンドウ法 ($O(n)$) を用いたウィンドウサイズ $w\{1\}$, $w\{16\}$, $w\{32\}$ に対するテストパターン数である。

例えば LN45-s1423a では、 $\mathbf{T}_{br} + \mathbf{T}_{ud_op}$ の個数は 68 個である。そのうち、 \mathbf{T}_{via} の個数は、グリーディ法では 11 個、順逆シミュレーション法では 15 個である。更に、 \mathbf{T}_{rem} の個数は、グリーディ法、3 種類のウィンドウ法に対して、それぞれ 50 個, 49 個, 46 個, 46 個である。合計はそれぞれ 61 個, 64 個, 61 個, 61 個であり、文献 [1] と比較してそれぞれ 1 個減少している。

提案法によるテストパターンの総計は列 Total で示されており、列 Total 中の太字部分は、本手法により結果が改善された部分を示す。従来法 [1] と比較して同一か最大で 9 パターン減少しており、提案手法が有効であることを示している。

4 まとめ

ビアオープン故障のモデルとしてビア貫通部のオープン故障およびビア上下の金属配線部分のオープン故障が考えられるが、これらは同じ数式として表されることを示した。また、ブリッジ故障を検出するテストパターンでは検出できないオープン故障に対し、これらを検出するテストパターンを圧縮操作前に追加すると、従来法に比べてテストパターン数が同一か小さいことを示した。

謝辞 有益なご議論を賜った日本大学生産工学部新井雅之准教授に感謝します。

参考文献

- [1] 小林泰生, 岩崎一彦, “ビアオープン故障を考慮した重み付き故障カバレッジに関する考察,” 信学技報, DC2017-74, pp. 31-36, 2017 年 12 月。