

論理再合成に向けた RECON スペアセル配置比率決定手法

On Ratio of Embedded RECON Spare Cell Types for Technology Remapping

鍋谷 泰彬[†] 黒木 修隆[†] 沼 昌宏[†]
Yasuaki Nabetani Nobutaka Kuroki Masahiro Numa

1. はじめに

LSI 開発工程では、機能仕様の変更や設計誤りの混入などが原因で、設計変更要求 (ECO : Engineering Change Order) がしばしば発生する。フォトマスク製造後に ECO (post-mask ECO) が発生した場合、フォトマスクの再製造を含めた設計のやり直しが必要となり、開発期間やコストが増大する要因となる。1 回以上の再設計が必要となるケースは全体の約 68% にのぼり、その約 50% が機能・論理設計の不具合に起因すると報告されている。

Post-mask ECO の対応には、製造済みのトランジスタ形成用マスクを再利用し、製造コストの低い配線形成用マスクのみを再設計する、メタル修正と呼ばれる方法が採られている。このメタル修正を効率的に行う手法として、reconfigurable (RECON) セルを用いた論理再合成手法が提

案されている。RECON セルは、配線層のみの変更で様々な機能を実現可能なセルで、トランジスタ数に応じて 2T/4T/6T-RECON セルがあり、トランジスタ数が多いほど多くの機能を実現可能である。RECON セルを、回路上にあらかじめ配置される予備のスペアセルとして用いることで、ECO の実現可能性を向上させることができる。しかし、従来手法では 6T-RECON セルのような多入力 RECON セルの配置数が不十分であるために、ECO 対応時に不足すると、修正部分のスペアセル割当てに失敗する可能性が高くなり、ECO の実現が不可能となる点に課題があった。

本稿では、post-mask functional ECO に対して論理再合成を行う際の、スペアセル割当ての実現可能性向上を目的として、設計段階で利用スペアセル数を予測することで回路上に配置する 2T/4T/6T-RECON セル数の比率を決定する手法を提案する。

2. 利用スペアセル数の予測に基づく RECON セル配置比率決定手法

ECO 対応時に、修正箇所が満たすべき機能を示す修正方法は、真値表で表現される [1]。この修正方法と RECON セルで実現可能な論理を登録したライブラリを用いて、修正箇所の部分ネットリストを生成するテクノロジー・マッピング処理によって、修正に必要な RECON セルの種類と数が決定される。しかし、回路上に配置する RECON セル数を決定するために必要な修正方法は、設計段階では明らかではない。そこで提案手法では、発生する可能性のある全ての修正方法について、設計段階であらかじめテクノロジー・マッピングを行うことで、修正に利用される RECON セル数の期待値を算出し、スペアセル割当てで成功率の向上を目指す。

図 1 に提案手法の概要を示す。論理合成に続き、配置配線を行う前の段階で、以下の手順で処理を行う。

- 各修正方法に対するテクノロジー・マッピングに基づく平均 RECON セル数の算出
- 配置前セルの入力数による分類比の抽出
- a) と b) の加重平均による RECON セル期待値の算出

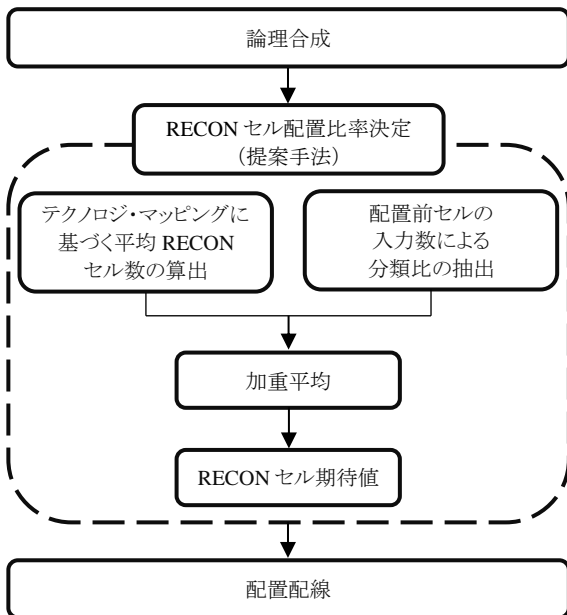


図 1 提案手法の概要

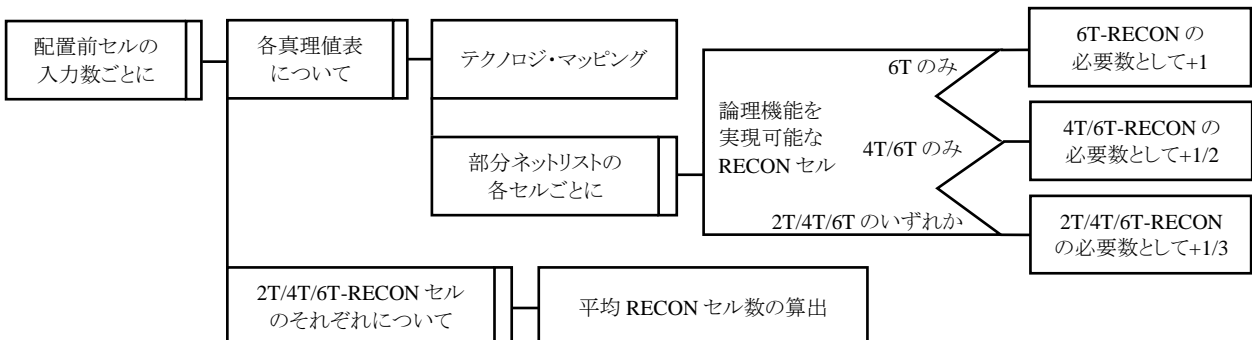


図 2 平均 RECON セル数の算出手順

[†] 神戸大学, Kobe University

まず a) では、修正に必要となる 2T/4T/6T-RECON セルの平均数をそれぞれ、配置前セルの入力数別に求める。図 2 に、平均 RECON セル数の算出手順を示す。

次に b) では、ネットリスト上の配置前セルを入力数で分類した比率を抽出する。修正箇所は、1 箇所につき 1 つのセルが修正対象となるため、この分類比は、セル入力数ごとの修正箇所としての発生頻度を表している。

最後に c) では、b) の分類比を重みとして、a) の平均 RECON セル数と入力数ごとに加重平均をとることで、修正箇所 1 箇所あたりに必要な RECON セル数の期待値を求める。ネットリストにおける配置前セルからなる集合を SC 、スタンダードセル・ライブラリのセル入力数の集合を IN_{SC} としたとき、 SC における n 入力セルの利用比率を $P_{sc}(n)$ 、平均 2T/4T/6T-RECON セル数をそれぞれ $Av_{g_{2T}}(n)$ 、 $Av_{g_{4T}}(n)$ 、 $Av_{g_{6T}}(n)$ とすると、2T/4T/6T-RECON セル数の期待値 E_{2T} 、 E_{4T} 、 E_{6T} は、それぞれ

$$E_{2T} = \sum_{i \in IN_{SC}} P_{sc}(i) \cdot Av_{g_{2T}}(i) \quad (1)$$

$$E_{4T} = \sum_{i \in IN_{SC}} P_{sc}(i) \cdot Av_{g_{4T}}(i) \quad (2)$$

$$E_{6T} = \sum_{i \in IN_{SC}} P_{sc}(i) \cdot Av_{g_{6T}}(i) \quad (3)$$

と表される。また、期待値 E_{2T} 、 E_{4T} 、 E_{6T} の合計を E_{total} で表すと、提案する RECON セル配置比率 (R_{2T} 、 R_{4T} 、 R_{6T}) は、

$$(R_{2T}, R_{4T}, R_{6T}) = \left(\frac{E_{2T}}{E_{total}}, \frac{E_{4T}}{E_{total}}, \frac{E_{6T}}{E_{total}} \right) \quad (4)$$

と表せる。

3. 実験と考察

3.1 実験概要

提案手法に関して、論理再合成への効果を評価するため、表 1 に示す従来手法 A、B とともに評価実験を行った。ベンチマーク回路として、ITC'99 から 5 種類を選び、各手法の配置比率に基づく RECON セルを、手法間でトランジスタ・ペア数が一定となるように、UniSpare [2] で配置した。表 2 に、b14 回路における RECON セルの内訳を示す。合計 $5 \times 3 = 15$ 例の回路に対して、修正箇所とその修正方法が無作為に設定した ECO を発生させ、多ゲート RECON セルを用いた論理再合成 [1] を行った。なお、修正箇所数は 1~20 箇所とし、それぞれの修正箇所数に対して 10 例の修正パターンを用意した。評価項目は、ECO 前の slack、ECO 後のスペアセル割当て成功率、slack 減少量、配線長増加量とした。

3.2 実験結果と考察

表 3 に、ECO 前の slack およびスペアセル割当て成功率の実験結果を示す。ECO 前の slack に関して、従来手法 A、B と比べてそれぞれ平均 25%、7% 減少した。UniSpare では、スタンダードセルの配置前にスペアセルを配置する関係で、占有面積の大きい 6T-RECON セルによってスタンダードセルの配置が妨げられるためと考えられる。一方で、b20、b22 回路のように従来手法 B よりも改善した例もあり、配置比率だけでなく配置手法にも依存すると考えられる。

スペアセル割当て成功率に関して、平均で従来手法 A、B に比べそれぞれ 2.0 pt、1.3 pt 向上しており、特に回路規模が小さいほど改善率が高くなった。これは、スペアセルの配置数が、回路規模に対して小さいために発生しやすい

表 1 実験対象の手法と配置比率

手法名	配置比率 (R_{2T} , R_{4T} , R_{6T})
従来手法 A	(0.33, 0.33, 0.33)
従来手法 B	(0.13, 0.55, 0.32)
提案手法	(0.11, 0.26, 0.63)

表 2 b14 回路の RECON セル内訳

セル種別	従来 A	従来 B	提案
2T-RECON セル	12	3	4
4T-RECON セル	12	18	7
6T-RECON セル	12	11	18
RECON セル面積 [μm^2]	464.5	438.7	419.3
RECON セル面積 [μm^2 /箇所]	12.9	13.7	14.5

表 3 ECO 前の slack とスペアセル割当て成功率の結果

回路例	ECO 前の slack [ns]			スペアセル割当て成功率 [%]		
	従来 A	従来 B	提案	従来 A	従来 B	提案
b14	0.236	0.216	0.167	52.5	54.0	57.0
b15	0.245	0.195	0.141	53.0	53.5	55.5
b20	0.259	0.177	0.216	92.0	92.0	93.0
b21	0.288	0.236	0.161	93.0	94.0	94.5
b22	0.181	0.102	0.150	99.5	100.0	100.0
平均	0.242	0.185	0.167	78.0	78.7	80.0

6T-RECON セルの枯渇に対して、提案手法による効果が大きく表れたためと考えられる。

ECO 後の slack 減少量に関して、平均で従来手法 A と比べて 1% 低減したものの、従来手法 B と比べて 12% 増加した。ECO 後の配線長増加量については、従来手法 A、B と比べてそれぞれ平均 9%、10% 低減する結果となった。

4. まとめ

本稿では、post-mask functional ECO に対して論理再合成を行う際のスペアセル割当ての実現可能性向上を目的として、利用スペアセル数の予測に基づく RECON セル配置比率決定手法を提案した。提案手法に基づいてスペアセルを配置した回路に対して評価実験を行った結果、面積の大きな 6T-RECON セルの配置比率が増加したためか、ECO 前の slack が減少した。その一方で、スペアセル割当て成功率が 1.3~2.0 pt 向上する効果が、配線長増加量に関する 9~10% の低減効果とともに確認され、提案手法がスペアセル割当ての実現可能性向上に有効であることを確認した。

今後の課題として、提案手法に適した初期回路の性能低下を抑える配置手法の考案や、さらなる配置比率の最適化を目指すべく、修正の規模に対するスペアセル数を考慮した配置比率の決定が挙げられる。

参考文献

- [1] T. Nishiguchi, N. Kuroki and M. Numa, "Technology remapping approach using multi-gate reconfigurable cells for post-mask functional ECO," IEICE Trans. Fundamentals, Vols. E107-A, no. 3, pp. 592-599, Mar. 2024.
- [2] K.-H. Chang, I. L. Markov and V. Bertacco, "Reap what you sow: spare cells for post-silicon metal fix," Proc. ACM Int. Symp. Phys. Design, pp. 103-110, 2008.