

Снижение аппаратурных затрат и увеличение коэффициента компрессии средств тестирования константных неисправностей КМОП цифровых СБИС

М.С. Ладнушкин

НИИ системных исследований РАН, Москва, maximsl@gmail.com

Аннотация — Проведён теоретический анализ элементов средств тестирования на основе технологии сканирования с компрессией и маскированием. Предложен метод проектирования средств тестирования КМОП цифровых СБИС, который позволил увеличить коэффициент компрессии на 23% и при этом сократить аппаратурные затраты на дополнительную тестовую логику в 5 раз.

Ключевые слова — средства тестирования и отбраковки, скан-технология, компрессия тестовых сигналов, генерация тестовых векторов, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Использование блоков сжатия тестовых данных для тестирования физических неисправностей СБИС позволяет существенно сократить время отбраковки микросхем с помощью технологии сканирования [1]. Сжатие тестовых данных осуществляется с помощью блоков декомпрессии и компрессии, которые устанавливаются на входах и выходах скан-цепей соответственно и позволяют распараллеливать тестовые данные на большее число скан-цепей.

Методы сжатия тестовых данных осуществляют компрессию/декомпрессию с потерями, что, как правило, не сильно сказывается на тестовом покрытии неисправностей ввиду небольшого числа значимых бит в тестовых последовательностях (от 1% до 5%) [2]. Увеличение коэффициента компрессии осуществляется за счёт сокращения длины скан-цепей, то есть увеличения числа скан-цепей. Однако с ростом числа скан-цепей растёт плотность неизвестных значений (X-значений) на выходах скан-цепей, что приводит к потере данных при выгрузке данных из скан-цепей. С увеличением числа скан-цепей также растёт число значащих бит на выходе декомпрессора, что в условиях ограниченной разрешающей способности декомпрессора приводит к неэффективному заполнению тестовыми последовательностями скан-цепей. Данные факторы являются причиной сокращения коэффициента компрессии с ростом числа скан-цепей и даже увеличения времени тестирования СБИС.

В данной работе проведён теоретический анализ элементов скан-схемы СБИС с X-компрессией и маскированием тестовых сигналов [3] и предложен

метод проектирования средств тестирования константных неисправностей цифровых СБИС, позволяющий сократить аппаратурные затраты на дополнительную тестовую логику до 5 раз и при этом увеличить коэффициент компрессии до 2,3 раз. В работе представлены результаты моделирования скан-схем с различными параметрами для двух проектов высоконадежных СБИС с проектными нормами 250 нм КНИ КМОП.

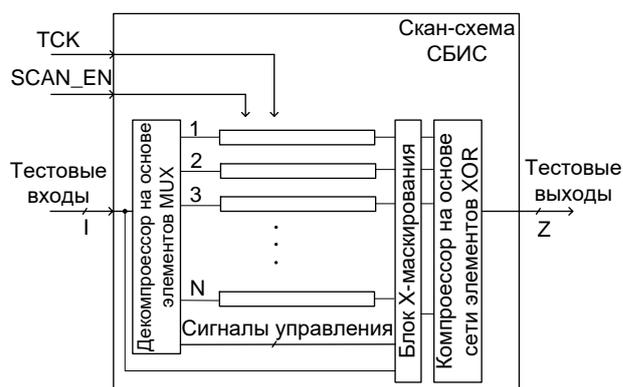


Рис. 1. Структура скан-схемы СБИС с X-компрессией и маскированием

II. АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ СКАН-СХЕМЫ СБИС С КОМПРЕССИЕЙ

Схема декомпрессора представляет собой широкоэвентальную схему (broadcast-scan-based scheme), построенную на принципе распространения одного входного сигнала на несколько выходных линий [4]. То есть каждая входная линия может задавать сигнал подмножества выходных.

Структура скан-схемы, построенной с использованием системы X-компрессии с маскированием, показана на рис. 1. Тестовые входные сигналы I подаются в декомпрессор тестовых сигналов, который представляет собой дерево мультиплексоров (MUX). Декомпрессор формирует сигналы тестовых данных для N скан-цепей, а также сигналы управления блоком выборочной выгрузки.

Характеристика блока декомпрессии с числом входов $I = 16$ и числом скан-цепей $N = 160$ показана на рис. 2 [5]. На оси абсцисс отмечено число значащих

бит декодируемого слова, а на оси ординат – вероятность декодирования слова с заданным числом значащих бит.

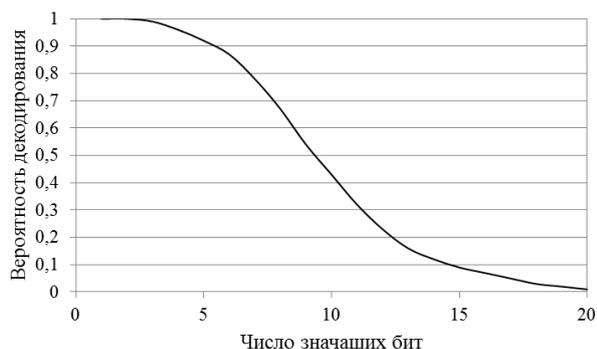


Рис. 2. Вероятность декодирования заданного числа значащих бит

Блок компрессора представляет собой дерево элементов ИСКЛ-ИЛИ (исключающее или), построенное согласно тройной системе Штейнера [3], [6]. Сигналы управления формируют сигналы маскирования данных, поступающих с выходов скан-цепей на элементы ИЛИ. Далее, маскированные данные попадают на входы компрессора (см. рис. 3).

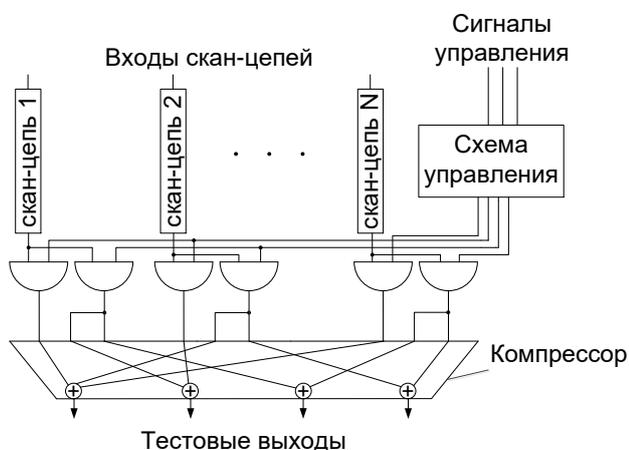


Рис. 3. Структура блока X-маскирования и компрессии

Возможны 3 режима маскирования в зависимости от коэффициента разветвления входных сигналов при прохождении через блок маскирования: прозрачный режим ($f = 3$); режим частичного маскирования ($f = 1$); режим прямого наблюдения ($f = 1$ или 0).

«Прозрачный режим» работы системы компрессии предпочтителен, так как в данном режиме достигается максимальное наблюдение всех входных данных – коэффициент разветвления каждого из входных сигналов равен 3 ($f = 3$). В данном режиме система гарантированно зафиксирует ошибку при количестве «X» на входе не больше 3 [3].

В «режиме частичного маскирования» наблюдаются все N скан-цепей и коэффициент разветвления каждого из входных сигналов равен 2

($f = 1$). В данном режиме максимальная наблюдаемость входных данных достигается при числе «X» на входе от 4 до 7.

Если на выходе скан-цепей число X-значений составляет 8 и более, то задействуется «режим прямого наблюдения», при котором блок X-маскирования фильтрует (маскирует) входные значения таким образом, что выходные значения скан-цепей напрямую транслируются на выходы без сжатия в блоке компрессии ($f = 1$ или 0). В «режиме прямого наблюдения» возможна трансляция Z числа скан-цепей из N возможных, то есть значения остальных ($N-Z$) данных не будут проанализированы, что приводит к потере данных. Данный режим обладает большей наблюдаемостью по сравнению с остальными режимами при числе «X» большем 7 (см. рис. 4).

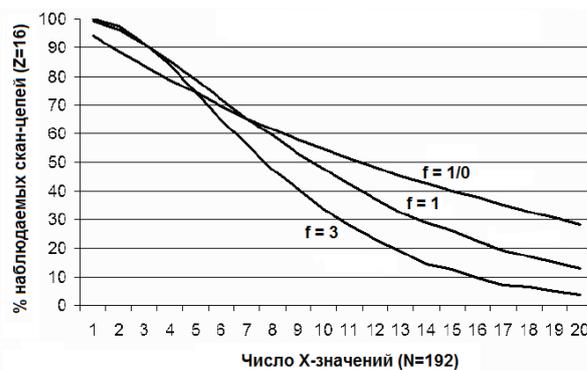


Рис. 4. Наблюдаемость данных во всех цепях в зависимости от числа «X» на выходе скан-цепей

Если предположить, что распределение X-значений внутри каждой скан-цепи линейное и вероятность захвата скан-триггером X-значения равна p , то вероятность возникновения n и более X-значений на выходах скан-цепей будет равно:

$$Y_{n+} = 1 - \sum_{k=0}^n C_N^k \times p^k (1-p)^{N-k}, \quad (1)$$

где C_N^k – сочетание из N цепей по k , N – число скан-цепей, p – вероятность захвата «X» скан-триггером, n – число X-значений на выходах скан-цепей в одиночном сдвиге. Отсюда – вероятность маскирования данных, которая приводит к отключению логики сжатия, будет равна выражению 1 при $n = 8$. График функции Y_{n+} при $n = 8$ и $p = 0,03$ показан на рис. 5.

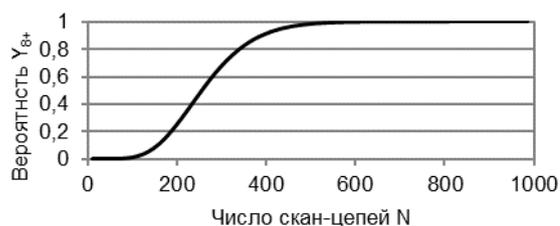


Рис. 5. Вероятность маскирования данных в зависимости от числа скан-цепей

Коэффициент компрессии используется для оценки сжатия тестовых данных и сокращения времени тестирования за счёт компрессии тестовых сигналов:

$$C_{\text{компр}} = \frac{t_{\text{без_компр}}}{t_{\text{компр}}} = \frac{Q_{\text{без_компр}} \times L_{\text{без_компр}}}{Q_{\text{компр}} \times L_{\text{компр}}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{компр}}$ – коэффициент компрессии, $t_{\text{без_компр}}$ – время тестирования без компрессии, $t_{\text{компр}}$ – время тестирования с компрессией, $Q_{\text{без_компр}}$ – количество векторов без компрессии, $L_{\text{без_компр}}$ – длина скан-цепей без компрессии, $Q_{\text{компр}}$ – количество векторов с компрессией, $L_{\text{компр}}$ – длина скан-цепей с компрессией. Коэффициент компрессии может быть также выражен формулой [6]:

$$C_{\text{компр}} = \frac{1}{\text{Infl}} \cdot \frac{N}{Z}, \quad (3)$$

где $C_{\text{компр}}$ – коэффициент компрессии, N – число внутренних скан-цепей, Z – число каналов, Infl – инфляция тестовых векторов. Инфляция тестовых векторов Infl выражается отношением [7]:

$$\text{Infl} = \frac{Q_{\text{компр}}}{Q_{\text{без_компр}}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{компр}}$ – количество векторов с компрессией, $Q_{\text{без_компр}}$ – количество векторов без компрессии. Инфляция тестовых векторов Infl – это увеличение числа тестовых векторов в режиме компрессии по сравнению с числом векторов без компрессии, вызванное недостаточной наблюдаемостью и контролируемостью триггеров скан-цепей. Инфляция Infl зависит от плотности X-значений на входе в компрессор, алгоритма работы автоматической генерации векторов, а также от разрешающей способности декомпрессора.

Рост числа скан-цепей N сопровождается линейным увеличением площади тестовой логики на кристалле в соотношении:

$$S_{\text{мест}} = S_0 + N \left(\frac{S_{\text{mux}}(M+1)}{3} + 2S_{\text{and}} + 2S_{\text{xor}} + S_{\text{mux}} \right), \quad (5)$$

где $S_{\text{тест}}$ – площадь тестовой логики, S_0 – необходимая площадь логики управления скан-схемы, N – число скан-цепей, M – число режимов декомпрессора, S_{mux} – площадь мультиплексора $2 \rightarrow 1$ на кристалле, S_{xor} – площадь элемента ИСКЛ-ИЛИ $2 \rightarrow 1$ на кристалле, S_{and} – площадь элемента И $2 \rightarrow 1$ на кристалле.

В качестве критерия оценки эффективности компрессии рассмотрена зависимость отношения коэффициента компрессии к площади тестовой логики на кристалле:

$$K(N, Z) = \frac{C_{\text{компр}}(N, Z)}{S_{\text{мест}}(N)}, \quad (6)$$

где K – эффективность компрессии, $C_{\text{компр}}$ – коэффициент компрессии, $S_{\text{тест}}$ – площадь тестовой

логики на кристалле, N – число скан-цепей. Из формулы 6 видно, что коэффициент K обратно пропорционален количеству скан-цепей.

Во избежание потери данных при выгрузке тестовых данных через компрессор согласно [3] число внутренних скан-цепей N должно удовлетворять условию:

$$N = Z \times 2^{Z-1}, \quad (7)$$

где Z – число внешних каналов данных.

При генерации тестовых векторов число значащих бит составляет от 1% до 3% в начале процесса. После небольшого числа векторов количество значащих бит падает ниже 0,1%, составляя в среднем 0,2% для числа векторов менее 16 000 [8]. Данное число векторов редко превышает при тестировании константных неисправностей (при тестировании переходных неисправностей число векторов в 2-5 раз больше). Архитектурно широкополосный декомпрессор, описанный в п.2, позволяет декодировать до трёх значимых бит на выходе. Таким образом, можно заключить, что для коэффициента заполнения от 0,2% до 3% число скан-цепей должно составлять от 100 до 1500, чтобы гарантированно декодировать необходимые значения в процессе автоматической генерации тестовых векторов.

Согласно формуле 1 для СБИС с вероятностью захвата скан-триггером X-значения от 0,004 до 0,03 при числе скан-цепей от 380 до 4000 с вероятностью 90% при выгрузке данных через X-компрессор будет выбран режим прямого наблюдения, обеспечивающий наблюдаемость $Z/N * 100\%$ скан-цепей.

Отсюда можно заключить, что инфляция тестовых векторов будет минимально сказываться на коэффициенте компрессии при пересечении вышеописанных множеств:

$$N \subset [380; 1500].$$

Так как согласно формуле 3 и 6 максимум функции $K(N, Z)$ будет достигнут при минимальном числе внешних тестовых каналов Z , то согласно формуле 6 получаем:

$$Z \subset [9; 10].$$

Таким образом, были получены условия достижения максимальной величины коэффициента компрессии на единицу площади тестовой логики при построении скан-схем СБИС с компрессией тестовых сигналов с использованием X-компрессора с маскированием и широкополосного декомпрессора.

III. МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВСТРОЕННЫХ СРЕДСТВ ТЕСТИРОВАНИЯ

На основании полученных теоретических результатов был предложен метод разработки скан-схемы с компрессией и маскированием СБИС для тестирования константных неисправностей, заключающийся в итерационном подборе параметров

скан-схемы на этапе разработки, позволяющий увеличить коэффициент компрессии тестовых данных и сократить аппаратные затраты. Метод основан на поиске оптимального числа скан-цепей и числа внешних каналов скан-схемы, при которых достигается максимальный коэффициент компрессии при минимальных аппаратных затратах. Поиск максимума функции эффективности компрессии $K(N)$ было предложено осуществлять с помощью метода Фибоначчи, так как среди методов нулевого порядка для одномерного поиска экстремума данный метод обладает наибольшей скоростью сходимости [9]. На основе предложенного метода была создана методика проектирования встроенных средств тестирования КМОП цифровых СБИС (см. рис. 6):

- 1) разработка скан-схемы без компрессии со встраиванием необходимой логики для исправления неконтролируемых синхросигналов, а также элементов, увеличивающих наблюдаемость и контролируемость скан-схемы;
- 2) оценка таких характеристик скан-схемы, как число скан-триггеров, время тестирования, площадь тестовой логики;
- 3) оценка вероятности p захвата скан-триггером X -значений;
- 4) выбор диапазона числа скан-цепей $380 < N < 1500$ и числа каналов Z , которое должно быть максимально возможным и удовлетворять условию $Z_{\max} \leq 10$;
- 5) итерационно методом Фибоначчи найти максимум функции $K(N)$;
- 6) создать финальную скан-схему с компрессией с полученными параметрами количества каналов Z и числа скан-цепей N .



Рис. 6. Предлагаемая методика

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования зависимостей $S_{\text{компр}}(N, Z)$ и $K(N, Z)$ от числа скан-цепей N и числа каналов Z были использованы два проекта СБИС в рамках ОКР «Схема-6» (СБИС №1) и ОКР «Обработка-2» (СБИС №2) с проектными нормами 250 нм КНИ КМОП,

которые отличаются интегральной сложностью. Краткие характеристики микросхем занесены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики проектов СБИС

Характеристика	№1	№2
Тип СБИС	Коммутатор	Процессор
Технология изготовления	КНИ КМОП 250 нм	
Число триггеров	76141	102028
Напряжение питания, В	3,3	
Число портов ввода/вывода	140	353
Число блоков ОЗУ	18	184
Число заказных блоков	6	6
Площадь, мм ²	47,5	103,0

Для оценки плотности неизвестных значений, возникающих в процессе тестирования, были созданы скан-схемы для каждого проекта СБИС с одной скан-цепью ($Z = N = 1$) в САПР Synopsys Design Compiler (см. рис. 7).



Рис. 7. Скан-схема СБИС с одной скан-цепью

Характеристики скан-схем, а также результаты генерации тестовых векторов с САПР Synopsys TetraMAX и моделирования отражены в табл. 2. В результате моделирования были получены выходные данные, которые содержали в том числе X -значения. Неизвестные X -значения откликов СБИС были подсчитаны в процессе моделирования всех тестовых векторов, после чего на основе полученных данных была построена диаграмма функций плотности распределения вероятности возникновения « X » $f(p)$ для двух проектов (см. рис. 8).

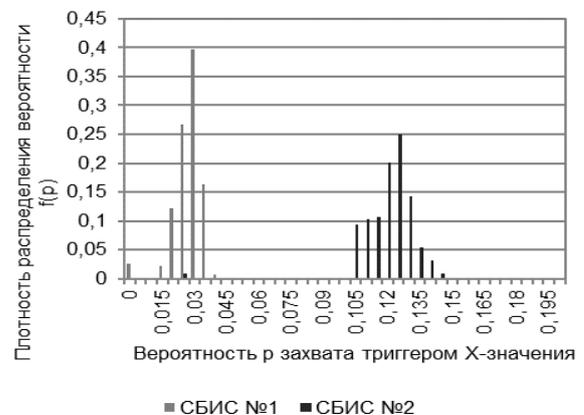


Рис. 8. Диаграмма плотности распределения $f(p)$ для проектов СБИС №1 и №2

Далее, для данных СБИС были созданы скан-схемы с различным числом тестовых каналов данных Z и числом внутренних скан цепей N в САПР Synopsys Design Compiler, которая осуществляет создание скан-схемы с заданными параметрами. Моделированием полученных моделей СБИС в САПР Synopsys TetraMAX были созданы тестовые последовательности на основе модели неисправности типа «залипание» (stuck-at) методом автоматической генерации тестовых векторов (ATPG).

Ввиду относительно небольшого числа триггеров СБИС использовался маршрут проектирования «сверху вниз», то есть скан-схема создавалась для всего проекта с верхнего уровня иерархии. Блок-схема маршрута проектирования СБИС показана на рис. 9 (затемнением на блок-схеме выделены задействованные этапы маршрута).

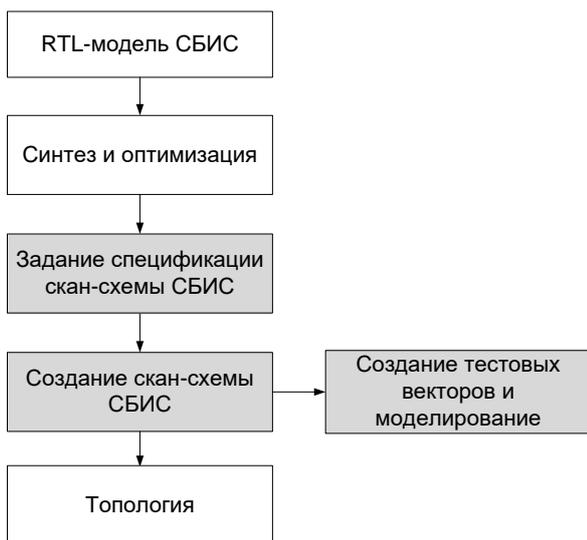


Рис. 9. Блок-схема маршрута проектирования СБИС с созданием средств тестирования

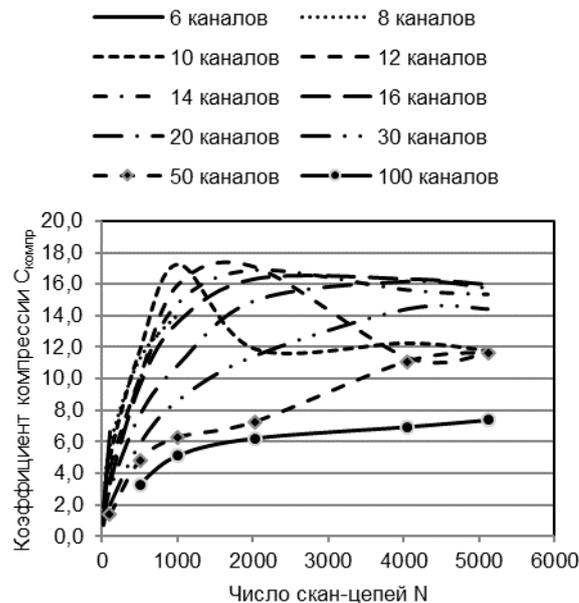
Аппаратурные затраты оценивались по формуле:

$$S_{\text{тест}} = S_{\text{скан}} - S_{\text{синтез}}, \quad (8)$$

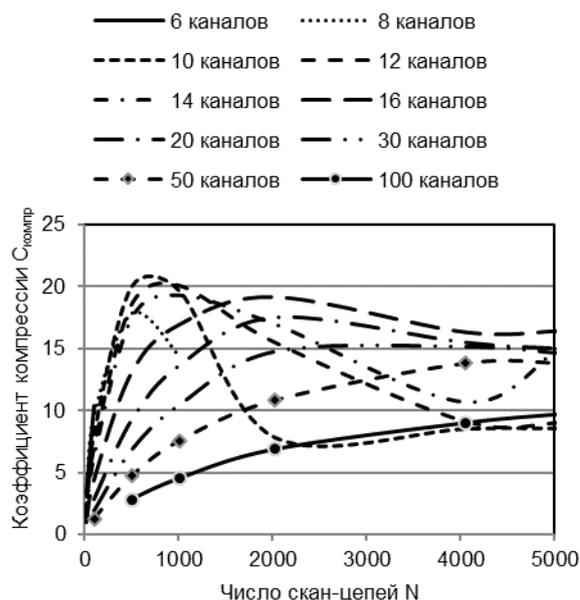
где $S_{\text{тест}}$ – площадь тестовой логики на кристалле, $S_{\text{синтез}}$ – площадь проекта СБИС после синтеза, $S_{\text{скан}}$ – площадь проекта СБИС после создания скан-схемы.

На основе полученных данных для каждой СБИС были рассчитаны значения коэффициентов компрессии $S_{\text{компр}}(N, Z)$ по формуле 2. Полученные результаты отражены на рис. 10.

Максимальное значение коэффициента компрессии достигается при $Z = 10$ и числе скан-цепей $N = 500 \dots 1500$. Из рис. 10б видно, что разница между максимальным и минимальным значением коэффициента компрессии составляет до 2,3 раз ($Z = 10$).



(а)



(б)

Рис. 10. Диаграмма зависимости коэффициента компрессии от числа скан-цепей N: (а) для СБИС №1; (б) для СБИС №2

Так как согласно формуле 5 аппаратурные затраты на тестовую логику практически не зависят от числа внешних каналов, по формуле 8 были рассчитаны значения площади тестовой логики для различного числа скан-цепей и числа каналов $Z = 10$ (см. рис. 11).

По формуле 2 были рассчитаны коэффициенты компрессии на единицу площади тестовой логики $K(N, Z)$ для каждой из СБИС (см. рис. 12).

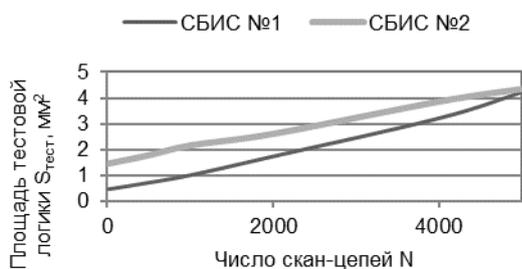
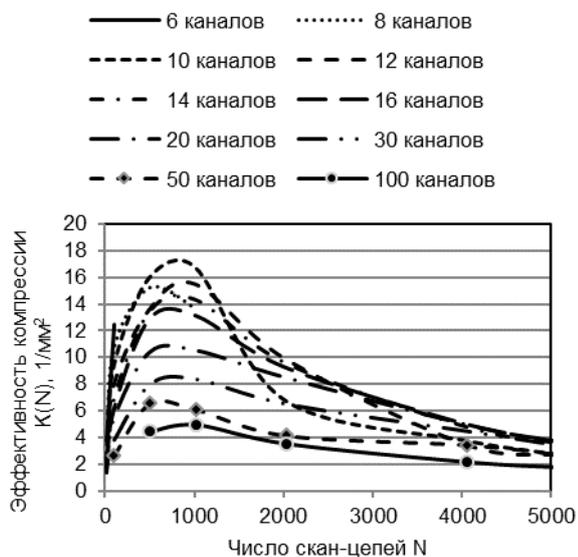
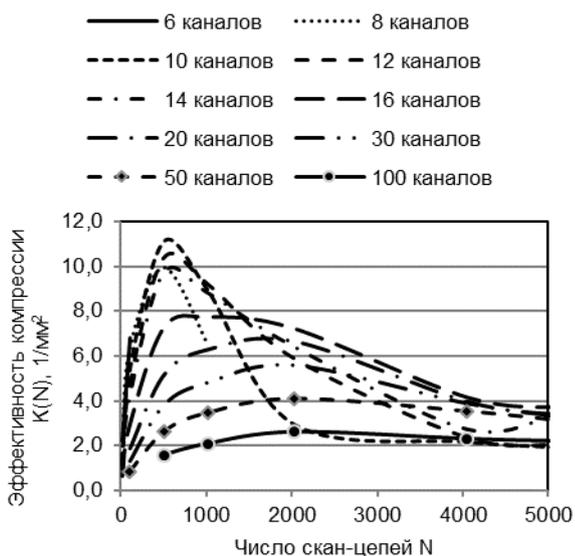


Рис. 11. Диаграмма зависимости площади тестовой логики от числа скан-цепей



(а)



(б)

Рис. 12. Диаграмма зависимости коэффициента эффективности компрессии K от числа скан-цепей N : а) для СБИС №1; б) для СБИС №2

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанный метод был использован при проектировании средств тестирования для СБИС в рамках ОКР «Схема-6» с проектными нормами 250 нм КНИ КМОП.

Результаты разработки скан-схемы без компрессии с одним каналом данных, оценка характеристик такой схемы, а также расчёт вероятности захвата скан-триггером неизвестных значений показаны в п.3 (СБИС №1).

Согласно методу Фибоначчи был выбран интервал неопределённости $[380; 1500]$ функции $K(N)$, а также решено было ограничиться шестью расчётами значения функции $K(N)$. Отсюда следует, что конечный интервал неопределённости будет равен

$$\delta_n = \frac{\delta}{\Phi_6} = \delta_6 = \frac{1120}{13} \approx 86, \quad (9)$$

где δ_n – длина конечного интервала неопределённости, n – число расчётов функции $K(N)$, F_n – число Фибоначчи. Каждую итерацию i вычисляются значения точек N_1 и N_2 по формулам

$$N_1 = a_i + \frac{F_{n-i-1}}{F_{n-i}}(b_i - a_i), \quad (10)$$

$$N_2 = a_i + \frac{F_{n-i}}{F_{n-i+1}}(b_i - a_i), \quad (11)$$

где a_i и b_i – границы i -ого интервала неопределённости, n – число расчётов функции $K(N)$, F_n – число Фибоначчи. Рассчитываем значение функций $K(N_1)$ и $K(N_2)$ по формуле 6 – для этого необходимо разработать скан-схемы с числом скан-цепей равным N_1 и N_2 и выбранным максимальным числом каналов Z . Результаты расчётов занесены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров при поиске максимума $K(N)$

Итерация i	a_i	N_1	N_2	b_i	$K(N_1)$	$K(N_2)$
1	380	810	1069	1500	16,89	16,18
2	380	638	810	1069	16,13	16,89
3	638	810	896	1069	16,89	16,84
4	638	724	810	896	16,64	16,89
5	724	810	810	896	16,89	16,89

Значение функции $K_{\max}(N)$ в середине конечного интервала неопределённости составило

$$K_{\max}(N) = K_{\max}(853) = 16,90.$$

Таким образом, были найдены значения параметров скан-схемы N и Z , при которых достигается максимальное сжатие данных при минимальных аппаратных затратах. Характеристики финальной скан-схемы занесены в табл. 3.

Характеристики скан-схемы СБИС «Схема-б»

Характеристика	Значение
Число тестовых каналов данных	10
Число внутренних скан-цепей	853
Длина внутренних скан-цепей	90
Время тестирования*, с	0,08
Коэффициент компрессии	14,5
Коэффициент эффективности компрессии, 1/мм ²	16,9
Площадь тестовой логики, мм ²	0,86

*При частоте тестового синхросигнала 10 МГц

Топология кристалла «Схема-б» с отмеченной на ней белым цветом тестовой аппаратурой показана на рис. 13. Крупный блок компрессии/декомпрессии тестовых сигналов расположен у контактных площадок связанных с портами ввода/вывода данных. Белые точки на рисунке – это тестовые мультиплексоры, увеличивающие наблюдаемость внутренних узлов СБИС в режиме тестирования.

Сравнивая полученные результаты с результатами моделирования, можно заключить, что использование предложенного метода разработки скан-схемы с компрессией и маскированием позволяет подобрать параметры скан-схемы таким образом, что аппаратные затраты на тестовую логику сокращаются до 5 раз (см. рис. 11). Коэффициент компрессии составил 14,5, что на 23% больше, чем при максимальном числе скан-цепей при том же числе каналов (см. рис. 10а).

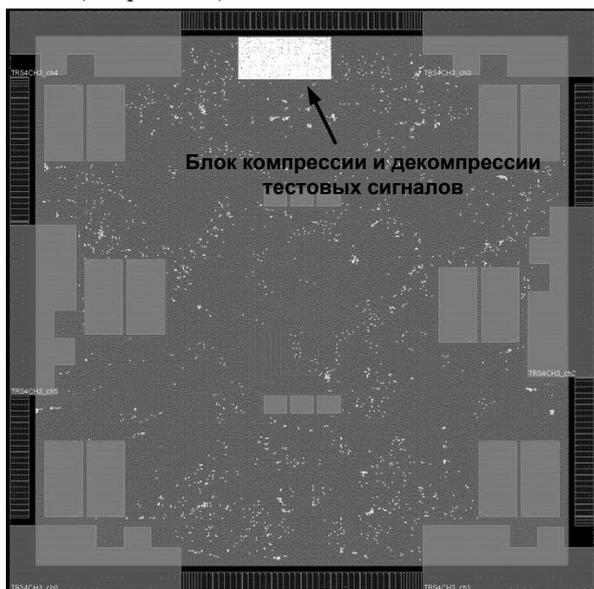


Рис. 13. Размещение тестовой логики на кристалле «Схемы-б» (отмечена белым)

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён теоретический анализ элементов средств тестирования на основе технологии сканирования с компрессией и маскированием.

Предложен метод разработки скан-схемы с компрессией и маскированием СБИС, заключающийся в итерационном подборе параметров скан-схемы на этапе разработки, позволяющий увеличить коэффициент компрессии тестовых данных и сократить аппаратные затраты.

Результаты показывают, что предложенный метод позволил сократить аппаратные затраты на дополнительную тестовую логику в 5 раз, а коэффициент компрессии увеличить на 23%.

На основе предложенного метода была разработана методика проектирования встроенных средств тестирования цифровых КМОП СБИС, которая была использована при проектировании средств тестирования СБИС в рамках ОКР «Схема-б» с проектными нормами 250 нм КНИ КМОП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ладнушкин М.С. Методика встроенного тестирования субмикронных цифровых КМОП СБИС // V Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2012». Сб. трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 485-488.
- [2] Wang L., Stroud Ch., Touba N. System-on-Chip Test: Nanometer Design for Testability. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. P.76.
- [3] Wohl P., Waicukauski J.A., Ramnath S. Fully X-Tolerant Combinational Scan Compression // International Test Conference. Oct. 2007. P.1-10.
- [4] Touba N. A. Survey of test vector compression techniques // IEEE Design & Test of Computers. July-August 2006. Vol. 23. №4. P. 294–303
- [5] Dutta A., Touba A. Using Limited Dependence Sequential Expansion for Decompressing Test Vectors // International Test Conference. Oct. 2006. P. 1-9.
- [6] Mitra S., Kim K.S. X-Compact: An Efficient Response Compaction Technique // Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. March 2004. P. 421-432
- [7] Wohl P., Waicukauski J.A., Neuveux F. Increasing Scan Compression by Using X-chains // IEEE Test Conference. Oct. 2008. P.1-10.
- [8] Rajski J., Tyszer J., Kasab M. et al. Embedded Deterministic Test // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Curcuits and Systems. V.23. N.5. May 2004. P.776-792
- [9] Лемешко Б.Ю. Методы оптимизации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. С. 6-10.

Reducing area and increasing compression ratio of scan compression system for digital VLSI using stuck-at fault model

M.S. Ladnushkin

Department of Russian Academy of Sciences Institute of System Researches of CAD Systems

Keywords — design-for-test, scan data compression, ATPG, modeling.

ABSTRACT

Combinational scan compression techniques are attractive for their low impact on area and high compression ratios. These compression techniques use methods of reducing scan chains length to the minimum values to decrease testing time and volume of test data.

Scan load compression techniques exploit the low density of care bits in scan load data. Scan unload compression techniques exploit the fact that error values appear more or less randomly, and only on a few scan chains at a time. However, high number of scan chains causes the growth of density of Xs (number of unknowns) and higher values of significant bits during load/unload.

Theoretical analysis of scan compression system built on Fully X-tolerant Combinational Scan Compression architecture was introduced. This architecture consists of load decompressor based on broadcast-scan-based scheme (MUX-based load decompressor) and unload compressor based on Steiner Triple System (XOR-based unload compressor) with X-masking logic (AND-based unload selector). Internal scan chains could be observed in three masking modes in dependence on density of Xs: transparent, single-fanout and direct observation modes.

Analysis shows that growing number of scan chains after a certain number results in reduction of compression ratio and higher testing time. Also higher number of scan chains means bigger area overhead because the test area is growing linearly with the number of scan chains. Therefore, the effectiveness of compression in terms of compression ratio divided by area overhead should have maximum at certain number of scan chains and external channels.

The method presented in this paper exploit the fact that high values of Xs density and significant bits during test lower the effectiveness of scan compression schemes. So reducing the number of scan chains could minimize the impact of scan compression system. The presented method is based on iterative seeking the optimal values of number of scan chains and number of external channels of scan architecture for testing constant faults of digital VLSI.

In the set of experimental results for two 250 nm digital VLSI designs, it was shown that increasing the number of scan chains could cause rising pattern inflation during ATPG. Inflation is influenced by several factors,

most notably by the restricted ability to target faults due to dependencies introduced by the load decompressor, and the effect of static and dynamic Xs.

With the help of the method, balance between area and compression ratio was found. Creating scan compression structures using this method can reduce area overhead up to 5 times while compression ratio could be increased up to 2.3 times. The diagrams of effectiveness of compression and compression ratio in dependence on number of scan chains and external channels are presented.

A methodology of creating scan compression architecture for digital VLSI based on the presented method was developed. It was used in creating scan compression system for 250 nm SOI VLSI "Shema-6". Area overhead was reduced by 5 times and compression ratio was increased by 23% comparing with scan compression system with the same number of external channels and maximum number of scan chains.

REFERENCES

- [1] Ladnushkin M.S. Metodika vstroennogo testirovaniya submikronnyh cifrovyyh KMOP SBIS // V Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem. 2012». Sb. trudov / pod obshh. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. Moscow, IPPM RAN, 2012. P. 485-488.
- [2] Wang L., Stroud Ch., Touba N. System-on-Chip Test: Nanometer Design for Testability. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2008. P.76.
- [3] Wohl P., Waicukauski J.A., Ramnath S. Fully X-Tolerant Combinational Scan Compression // International Test Conference. Oct. 2007. P.1-10.
- [4] Touba N. A. Survey of test vector compression techniques // IEEE Design & Test of Computers. July-August 2006. Vol. 23. №4. P. 294–303
- [5] Dutta A., Touba A. Using Limited Dependence Sequential Expansion for Decompressing Test Vectors // International Test Conference. Oct. 2006. P. 1-9.
- [6] Mitra S., Kim K.S. X-Compact: An Efficient Response Compaction Technique // Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. March 2004. P. 421-432
- [7] Wohl P., Waicukauski J.A., Neuveux F. Increasing Scan Compression by Using X-chains // IEEE Test Conference. Oct. 2008. P.1-10.
- [8] Rajski J., Tyszer J., Kasab M. et al. Embedded Deterministic Test // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. V.23. N.5. May 2004. P.776-792
- [9] Lemeshko B.Ju. Metody optimizacii. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. P. 6-10.