

К. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: Galina_onpu@mail.ruДата поступления в редакцию
01.10 2009 г.Оппонент д. т. н. В. В. БАРАНОВ
(БГУИР, г. Минск)ОЦЕНКА СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ БИС
С ПОМОЩЬЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ*Предложен метод выбора количества избыточных элементов БИС без неоправданного увеличения площади БИС.*

Современный этап развития полупроводникового производства характеризуется ростом плотности компоновки БИС, из-за чего возрастает количество производственных дефектов и сокращается выход годных БИС.

Устойчивость к появлению дефектов у некоторых типов БИС обеспечивается путем структурной избыточности (резервирования), т. е. добавления к их схеме дополнительных элементов. Этот подход характерен для схем, состоящих из таких модулей как элементы памяти и цифровой логики. Однако количество дополнительных (резервных) элементов должно быть обоснованным, чтобы не вызывать неоправданного роста площади ИС.

Традиционно количество дополнительных элементов БИС определяется при требуемом уровне выхода годных с помощью различных компаунд-распределений на основе обобщенного распределения Пуассона [1—4]. Точность в значительной мере обусловлена типом функции, применяемой при обобщении распределения Пуассона. Эти функции разнятся количеством параметров, позволяющих оценивать статистические характеристики распределения дефектов на поверхности пластины при производстве БИС. Такими параметрами являются: постоянный для данного производства и типа ИС коэффициент (учитывает систематические технологические дефекты), среднее количество дефектов на единицу площади, коэффициент кластеризации, учитывающий неравномерность распределения этих дефектов, размер «блока» — единицы измерения размера кластера.

Вид компаунд-распределения (крупнокластерное или среднекластерное отрицательное биномиальное распределение) выбирается в зависимости от соотношения размеров кластера и анализируемой области. Для БИС с площадью больше квадратного дюйма большую точность при оценке выхода годных и, следовательно, при выборе количества дополнительных элементов дает среднекластерное отрицательное биномиальное распределение.

Оценка среднего количества дефектов проводится с учетом типа ИС, особенностей производственных линий и процессов обработки пластин.

При определении коэффициентов кластеризации применяется понятие «блока» как единицы измерения площади кластера [1]. Блоки статистически независимы друг от друга. Внутри блоков дефекты распределены равномерно, коррелированы между собой, их число в каждом блоке имеет отрицательное биномиальное распределение.

Как правило, для подобного исследования на производстве с целью сокращения затрат предъявляется малое количество пластин (10—12). В статистике это — малая выборка. Но определить размер блока в случае малых выборок сложно, т. к. ошибки оператора, сбои оборудования при измерении обуславливают искажение данных о дефектах при малом их объеме. Методы, основанные на сравнении распределений этих данных, чувствительны к отклонениям («шуму») данных. Влияние этих недостатков может быть уменьшено с помощью помехоустойчивых процедур кластеризации [4] при определении размера блока.

Настоящая статья посвящена разработке метода, позволяющего формализовать процедуру оценки необходимой избыточности БИС (при заданном уровне выхода годных) на основе выбора размера блока среднекластерного отрицательного биномиального распределения с помощью помехоустойчивого мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования.

Анализ методов оценки выхода годных ИС

При оценке выхода годных ИС используют компаунд-распределения дефектности.

Дефекты, приводящие к потере годных ИС при их производстве, распределены внутри пластины неравномерно, образуют кластеры, поэтому мелкокластерное распределение, не учитывающее этот эффект, дает меньшую точность при оценке выхода годных [4].

Вероятность того, что число дефектных модулей k будет равно 0 в рамках компаунд-распределения Пуассона для крупнокластерного распределения, когда вся микросхема располагается внутри одного блока, определяется согласно формуле

$$Y = P(k = 0) = (1 + N\lambda_m / \alpha_m)^{-\alpha_m}, \quad (1)$$

где k — число дефектных модулей;

N — размер микросхемы в модулях [1, 2];

λ_m — среднее число дефектов на один модуль;

α_m — параметр кластеризации.

Размер блока для крупнокластерного распределения равен всей площади пластины (в модулях). Достоинства такого представления — простота определения α_m и λ_m методом «окна» [3], нет необходимости определять размер блока. Недостаток — низкая точность для микросхем высокой степени интеграции и большой площади, когда размер микросхемы становится больше размера кластера.

Для среднекластерного распределения, когда размер блока B лежит в пределах $1 < B < N$, формула (1) преобразуется к виду

$$Y = P(k=0) = (1 + B\lambda_m / \alpha_m)^{-\frac{N}{B}\alpha_m}.$$

Среднекластерное распределение включает в себя крупнокластерное и мелкокластерное распределения как предельные случаи. Коэффициент кластеризации этого распределения α внутри блока постоянен, но возрастает, когда рассматриваемая область включает в себя несколько блоков. Для определения размеров блока разработан ряд методов. Однако в [1] авторы констатируют, что в случае малых выборок (малого количества исследуемых пластин) даже сочетанием этих методов определить размер блока сложно.

Следует учитывать также, что размер блока итерационно определяется заново для каждого вида производства и разных типов ИС. Это определение в пределах пластины предполагает перебор различных сочетаний количества и расположения модулей, входящих в блок. Все варианты распределения выхода годных ИС чувствительны к шумовым измерениям при контроле по малым выборкам [1]. Поэтому в настоящей работе автором предложен метод, позволяющий формализовать процесс определения размеров блока для оценки структурной избыточности БИС с помощью среднекластерного распределения на базе помехоустойчивого мультистартового субградиентного итеративного метода кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования [5].

Оценка параметров среднекластерного распределения

Задача кластеризации состоит в разбиении множества образов объектов на группы (кластеры) с учетом сходства объектов, которое определяют через расстояния в признаковом пространстве. При отсутствии априорной информации о форме исследуемых кластеров и с учетом предполагаемой зашумленности выборки для решения задач оптимизации разработан помехоустойчивый субградиентный итеративный метод оптимизации в пространстве вейвлет-преобразования [6]. Для повышения помехоустойчивости кластеризации на основе этого метода оптимизации разработан мультистартовый субградиентный итеративный метод кластеризации в пространстве вейвлет-преобразования.

Экспериментальные исследования помехоустойчивости этого метода кластеризации показали, что относительная погрешность определения минимума тестовой функции составила 8,32% при величине отношения амплитуд сигнала и шума 1,17 [5].

Предлагается использовать этот метод кластеризации при оценке параметров среднекластерного рас-

пределения, поскольку при анализе выхода годных БИС, как правило, мал объем выборок (количество исследуемых пластин), что может привести к зашумленности выборки.

Для его реализации предлагается следующая процедура.

1. Полупроводниковые пластины разделяются на модули равной площади [1].

2. Определяется количество дефектов на модуле λ_m и коэффициент кластеризации для модуля α_m по методике [4]. Тогда

$$\hat{\lambda}_m = \bar{X} = \frac{1}{SW} \sum_{i=1}^{SW} X_i,$$

где $\hat{\lambda}_m$ — оценка λ_m ;

$\bar{X}$ — среднее число дефектов на модуле;

S — количество пластин;

W — количество модулей на пластине;

X_i — число дефектов на i -м модуле ($i=1, \dots, SW$).

Оценка α_m проводится с учетом того, что число дефектов X имеет отрицательное биномиальное распределение с параметрами λ_m , α_m . Оценка дисперсии будет иметь вид

$$\hat{V}(X) = \frac{1}{SW} \sum_{i=1}^{SW} X_i^2 - \bar{X}^2,$$

а оценка коэффициента кластеризации для модуля

$$\hat{\alpha}_m = \frac{\bar{X}^2}{\hat{V}(X) - \bar{X}}.$$

Коэффициент кластеризации блока определяется как $\hat{\alpha}_b = \hat{\alpha}_m$ [1].

3. С заданной точностью θ определяется количество, центр, диаметр кластеров с помощью помехоустойчивого мультистартового метода кластеризации [5].

4. Для каждого из этих вариантов кластеров определяется максимальное целое число модулей, входящих в кластер.

5. Формируется вариационный ряд площадей кластеров, выраженных в модулях. Эти значения (I, J) принимаются как значения размеров блоков для первой итерации.

6. Определяется размер блока.

6.1. По методике [4] последовательно формируется матрица оценок коэффициентов кластеризации α для потенциальных размеров блока от 1×1 и до $I \times J$ модулей; отыскивается наибольший размер $I \times J$, для которого $\hat{\alpha}(I, J)$ меньше, чем $\hat{\alpha}(1, 1)$, который и принимается за размер блока.

По второму методу оценки размер блока $B_1 \times B_2$ определяется в два этапа (количество модулей по длине I и по ширине J кластера). Исследуемая пластина делится на блоки размером $(I \times J)$ модулей. Чтобы определить B_1 и B_2 , формируются две матрицы, содержащие результат проверки по критерию χ^2 статистической независимости между соседними блоками. Значения I и J , которые определяют выбор B_1 и B_2 , определяются по первой строке и столбцу соответствующих матриц, в которых значения χ^2 значительно ниже, чем в других.

6.2. Последовательно, начиная с минимального, сравниваются значения (I, J) из вариационных рядов, полученных в пп. 5 и 6.1. При совпадении результатов с заданной точностью ϕ принимается минимальный размер блока, который затем сравнивается с результатами экспериментальной оценки выхода годных.

Если оценки размеров блока в пп. 5 и 6.1 отличаются более чем на ϕ , рекомендуется повысить точность кластеризации (уменьшить θ) и повторить расчеты по пп. 3—6. Если различаются все три оценки размеров блока по пп. 5 и 6.1, выбирают тот размер блока, который при сравнении с результатами экспериментальной оценки выхода годных дает меньшую ошибку.

7. Определяется количество дефектов блока $\lambda_b = B\lambda_m$. Здесь $B = B_1 B_2$ — площадь блока.

Оценка структурной избыточности БИС

При оценке структурной избыточности рассчитывают выход годных ИС, содержащих N идентичных модулей, из которых только M — необходимые для функционирования, а $(N-M)$ — избыточные. Эти избыточные модули могут заменять любой из M модулей, если он дефектен.

Оценка структурной избыточности БИС проводится в такой последовательности.

1. По методике [4], с учетом того, что ИС не обязательно включает в себя целое число блоков (оценку размеров блока проводят для пластины), поверхность ИС разделяется на области, принадлежащие разным блокам. Общее число свободных от дефектов модулей ИС равно суммарному количеству таких модулей в ее частях. Так как эти области принадлежат различным блокам, распределение числа свободных от дефектов модулей $P_G(k)$ равно вероятности того, что ровно k из N модулей свободны от дефектов $a(k, N)$, т. е. определяется по формуле [3, 4]

$$P_G(k) = a(k, N) = C_N^k \sum_{l=0}^{N-k} (-1)^l C_{N-k}^l \left(1 + \frac{(k+l)\lambda_m}{\alpha_m} \right)^{-\alpha_m}.$$

2. Определяется количество и размеры указанных областей в блоках или модулях.

3. Определяются вероятности того, что ровно k_i модулей, свободных от дефектов, имеется в i -й области:

$$P(G_i = k_i) = a(k_i, A_i),$$

где A_i — площадь i -й области, содержащейся в одном блоке.

4. Определяются вероятности того, что ровно k_{is_i} модулей, свободных от дефектов, имеются в j -й части i -й области. Эти вероятности определяются посредством композиции [7] по k_i значений вероятностей $a(k_{i1}, A_i)$, $a(k_{i2}, A_i)$, ..., $a(k_{is_i}, A_i)$.

Здесь j — номер части области, $j=1, \dots, s_i$; k_{ij} — число бездефектных модулей в j -й части i -й области,

$$k_i = \sum_{j=1}^{s_i} k_{ij} \quad [4].$$

5. С учетом того, что число бездефектных модулей ИС G определяется как сумма числа бездефектных модулей z ее областей G_i [4]

$$G = \sum_{i=1}^z G_i,$$

вероятность $P_{(R_1, R_2)}(G=k)$ получения k бездефектных модулей будет определяться посредством композиции [7] значений вероятностей $P(G_1=k_1)$, $P(G_2=k_2)$, ..., $P(G_z=k_z)$.

Здесь $k = \sum_{j=1}^z k_{ij}$; R_1 и R_2 — расстояния по вер-

тикали и горизонтали между левым верхним углом ИС и соответствующими границами блока.

После учета всех возможных вариантов размещения, т. е. (R_1, R_2) , вычисляется среднее распределение

$$P_G(k) = \frac{1}{C_1 C_2} \sum_{R_1=1}^{C_1} \sum_{R_2=1}^{C_2} P_{(R_1, R_2)}(G=k).$$

6. Тогда выход годных ИС определяется [3, 4] как

$$Y_{IS} = \sum_{k=M}^N P_G(k).$$

Оценка выхода годных в случае, когда ИС включает в себя не только аналогичные модули, но и некоторые сопровождающие их подсистемы, предполагает расчет вероятности выхода годных с учетом этих подсистем [3].

7. Оценивается эквивалентный выход годных при определенных значениях количества дефектов λ_w , коэффициента кластеризации α_w для пластины и размерах блока B для различного числа избыточных модулей. Выбирается число избыточных модулей, которому соответствует максимальный эквивалентный выход годных Y .

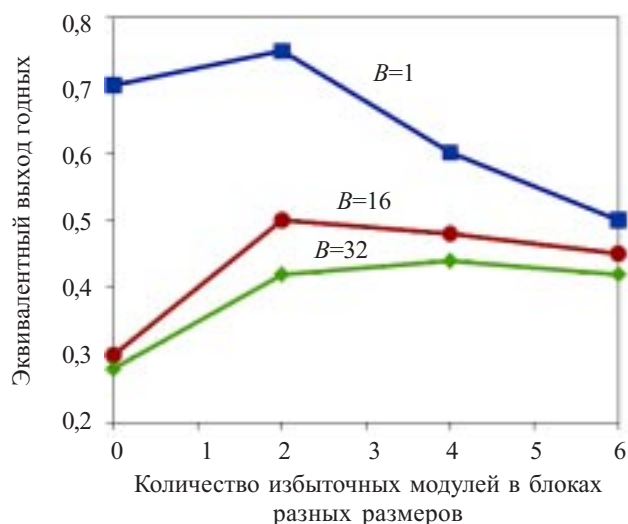
Коэффициент кластеризации для пластины определяется как [3, 4]

$$\alpha_w = \alpha_b \frac{W}{B},$$

где W — площадь пластины.

Эквивалентный выход годных Y определяется как частное от деления выхода годных Y_{IS} на отношение площади ИС с избыточными модулями к площади ИС без них.

Исследование влияния размера блока на количество дополнительных модулей было проведено посредством моделирования на ЭВМ пластины размером 24×24 модуля с ИС размером 2×3 модуля. Число дефектов задавалось в соответствии с отрицательным биномиальным распределением при $\lambda_w = 260$ и $\alpha_w = 8$. К ИС добавлялись избыточные модули, и оценивалась эквивалентная вероятность получения годных ИС для различных размеров блока $B = 1; 16$ и 32 . Оптимальная избыточность для данного набора параметров (число модулей, для которых эквивалентная вероятность получения годных ИС будет макси-



мальной) будет равна 2 для значений $B=1$ и $B=16$ и 4 для $B=32$ (см. рисунок).

Выводы

Таким образом, предложенный метод, основанный на оценке размеров блока среднеластерного отрицательного биномиального распределения с помощью помехоустойчивого метода кластеризации в простран-

стве вейвлет-преобразования позволяет выбирать количество избыточных элементов без неоправданного увеличения площади БИС при использовании на этапе исследования малых выборок данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Koren I., Koren Z., Stapper C. H. A statistical steady of defect maps of large area VLSI IC's // IEEE Transaction on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. — 1994. — Vol. 2, N 2. — P. 249—256.
2. Богданов Ю. И., Богданова Н. А., Дшхунян В. Л. Статистические модели управления дефектностью и выходом годных в микроэлектронике // Микроэлектроника. — 2003. — Т. 32, № 1. — С. 62—76.
3. Koren I., Stapper C. H. Yield models for defect-tolerant VLSI circuits: a review // Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems. — 1988. — V. 1. — С. 1—21.
4. Koren I., Koren Z., Stapper C. H. A unified negative-binomial distribution for yield analysis of defect-tolerant circuits // IEEE Transaction on Computers. — 1993. — Vol. 42, N 6. — P. 724—734.
5. Щербакова Г. Ю., Крылов В. Н. Адаптивная кластеризация в пространстве вейвлет-преобразования // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. — 2009. — № 6 (40). — С. 123—128.
6. Крилов В. Н., Щербакова Г. Ю. Субградієнтний ітеративний метод оптимізації в просторі вейвлет-перетворення // Збірн. наук. праць Військового інституту Київського нац. ун-ту ім. Т. Г. Шевченка. — 2008. — Вип. 12. — С. 56—60.
7. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. — М.: Мир, 1964.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Тихонов В. И., Шахтарин Б. И., Сизых В. В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации. Т. 5. — М.: Горячая линия — Телеком, 2009. — 400 с.

В пятом томе задачника в первой части представлены задачи по оценке сигналов, их параметров и энергетических спектров. Рассмотрены задачи на вычисление границ Рао-Крамера для дисперсии оценок, на определение оценок методами максимального правдоподобия и байесовских критериев, а также задачи на оценивание случайных сигналов фильтрами Винера и Калмана, приведены примеры приложения теории нелинейного оценивания (метод Стратоновича) и задачи на оценивание спектра. Во второй части пособия даны задачи на вычисление энтропии распределений, а также задачи по кодированию и по оценке помехоустойчивости систем передачи сообщений.

В данном томе задачника собрано большинство тем, имеющих отношение к оценке сигналов, их параметров и энергетическому спектру. Для студентов, аспирантов и специалистов, заинтересованных в решении представленных задач.

