

К. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: Galina\_onpu@mail.ru

Дата 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 предьявляется 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];

$\lambda_m$  — среднее число дефектов на один модуль;

$\alpha_m$  — параметр кластеризации.

Размер блока для крупнокластерного распределения равен всей площади пластины (в модулях). Достоинства такого представления — простота определения  $\alpha_m$  и  $\lambda_m$  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  $\alpha$  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  $\lambda_m$  и коэффициент кластеризации для модуля  $\alpha_m$  по методике [4]. Тогда

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

где  $\hat{\lambda}_m$  — оценка  $\lambda_m$ ;

$\bar{X}$  — 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  $\alpha_m$  проводится с учетом того, что число дефектов  $X$  имеет отрицательное биномиальное распределение с параметрами  $\lambda_m, \alpha_m$ . 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  $\theta$  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  $\alpha$  для потенциальных размеров блока от  $1 \times 1$  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  $\chi^2$  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  $\chi^2$  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  $\varphi$  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  $\varphi$ , рекомендуется повысить точность кластеризации (уменьшить  $\theta$ ) 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  $k_{is_j}$  модулей, свободных от дефектов, имеются в  $j$ -й части  $i$ -й области. Эти вероятности определяются посредством композиции [7] по  $k_j$  значений вероятностей  $a(k_{i1}, A_i), a(k_{i2}, A_i), \dots, a(k_{is_j}, A_i)$ .

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

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

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  $P(G_1=k_1), P(G_2=k_2), \dots, P(G_z=k_z)$ .

Здесь  $k = \sum_{jj=1}^z k_{ij}$ ;  $R_1$  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 подсхемы, предполагает расчет вероятности выхода годных с учетом этих подсхем [3].

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

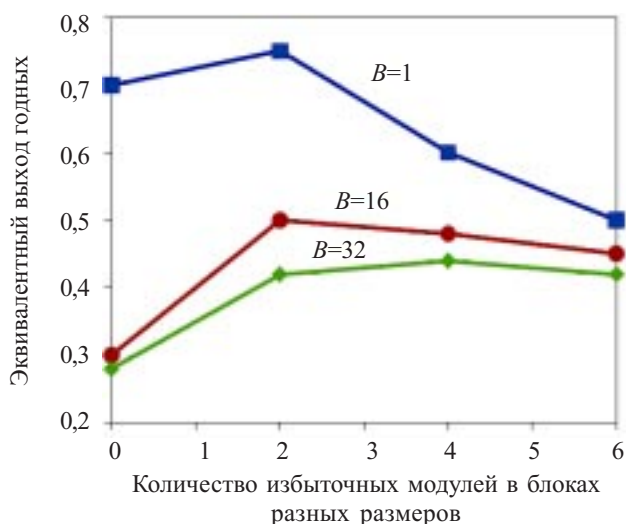
Коэффициент кластеризации для пластины определяется как [3, 4]

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

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 среднекластерного 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.

