

УДК 681.327.2

Е.А.Верняковский, П.П.Урбанович

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТКАЗОВ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ

Описаны экспериментально полученные статистические характеристики распределения производственных и эксплуатационных отказов запоминающих элементов в накопителях БИС ЗУ информационной емкостью 4 К. Показано, что по мере совершенствования технологии, конструкции и других особенностей производства БИС характер распределения производственных отказов от группирования изменяется в сторону статистической независимости.

Задачи повышения технологичности и надежности ИС ЗУ обусловили значительный интерес специалистов к структурно-логическим методам нейтрализации отказов, возникающих в ЗУ при производстве и эксплуатации этих приборов. Реализация отмеченных методов предусматривает использование дополнительных (избыточных) элементов и узлов, предназначенных для замещения или локализации неисправностей [1]. Получение максимального выигрыша при минимальных затратах должно основываться на учете реальных статистических характеристик неисправностей элементов конкретных устройств либо на использовании математических моделей. Следовательно, для определения вводимой на кристалл избыточности важно знать ожидаемый уровень плотности дефектов и интенсивности отказов элементов устройства уже на этапе его проектирования [2, 3].

Распределение производственных дефектов по пластине или на отдельных кристаллах в первом приближении может быть описано законом Пуассона [2]. Однако полученные в последнее время результаты [3,4] свидетельствуют о том, что дефекты и вызванные ими отказы (производственные) элементов устройств на кристаллах БИС и на целых пластинах группируются. Вопрос же о характере такого группирования дефектов и отказов как производственных, так и возникающих при эксплуатации БИС (назовем их эксплуатационными отказами), об их взаимном влиянии пока не изучен. В настоящей статье обобщены полу-

ченные экспериментально результаты распределения отказов на кристаллах биполярной БИС ЗУ информационной емкостью 4 К, изготовленных по технологии с окисной изоляцией. Эксперименты проводились в течение нескольких лет.

Возникающий на кристалле дефект может попасть в любую область БИС и, соответственно, повредить любой функциональный узел устройства, что, в свою очередь, приведет к нарушению работоспособности всего устройства или определенного числа запоминающих элементов (ЗЭ) накопителя, каждый из которых может хранить один бит информации. Дефект, расположенный вне зоны накопителя, проявляется прежде всего в нарушении нормального функционирования определенных ЗЭ. В соответствии с этим количество дефектов в явном виде не фиксировалось. Определялось лишь количество отказавших ЗЭ (производственных отказов ЗЭ).

Проведенные исследования могут быть условно разделены на три этапа. Первый этап (I) — начальный — характеризуется улучшением конструкции БИС, устранением схемотехнических и топологических ошибок, отработкой технологического процесса, второй (II) и третий (III) этапы — дальнейшим совершенствованием и стабилизирующей технологическим процессом. Объем исследованных кристаллов позволял считать полученные результаты статистически достоверными. Всего проанализировано распределений отказов более чем на полутора тысячах кристаллов БИС.

В результате обработки экспериментальных результатов получены основные характеристики распределения кристаллов; по числу отказавших ЗЭ, по количеству неисправных строк и столбцов ЗЭ накопителя, по числу отказавших ЗЭ в строках накопителя. Каждое из указанных распределений имеет довольно длинный "хвост", что характерно и для других типов БИС ЗУ [2].

Анализ усеченных гистограмм распределения кристаллов N по числу q дефектных ЗЭ для каждого этапа исследований (рис. 1) показывает, что на каждом последующем этапе изменялся "вес" кристаллов с определенным числом q дефектных ЗЭ в общем объеме выпускаемых изделий. (На рисунках темным цветом выделены значения для I этапа, заштриховано для II, остальные — III). Соотношение объемов кристаллов между этапами, число отказавших ЗЭ в которых не превышает 4, почти эквивалентно соотношению бездефектных устройств для соответствующих этапов исследований.

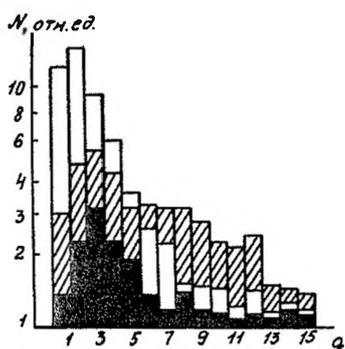


Рис.1.

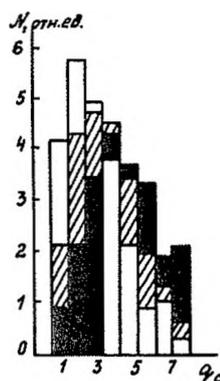


Рис.2.

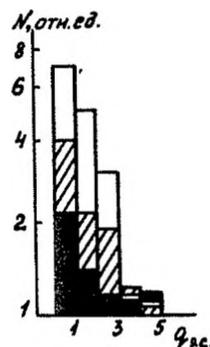


Рис.3.

Количество частично годных устройств, эффективная емкость которых составляет 2 или более К, и объем кристаллов, на которых неисправны не более 4 ЭЭ, на каждом из этапов эксперимента практически не различались. Это значит, что для данного типа БИС ЗУ по количеству частично годных устройств можно составить довольно точное представление и о распределении кристаллов по числу неработоспособных ЭЭ накопителя.

Анализ показал, что за время проведения эксперимента вероятность появления отказавшего ЭЭ снизилась примерно на полтора порядка в основном за счет уменьшения относительного количества кристаллов с "фатальными" или группирующимися в отдельных строках (столбцах) накопителя отказами. Из табл. 1 видно, что точное совпадение теоретических и экспериментальных результатов соответствует единице, а также что реальные и расчетные результаты имеют наибольшие различия для начальных значений q . На заключительном отрезке эксперимента модель приближается к реальным статистическим характеристикам. Можно предположить, что с течением времени это различие будет все более уменьшаться.

Из распределения кристаллов по количеству неисправных строк ЭЭ видно (рис. 2), что относительный объем устройств, в накопителях которых находится не более 8 отказавших строк (в этом случае отказавшей считалась строка, в которой нарушено функционирование хотя бы одного ЭЭ), от этапа к этапу практически не менялся. Характер распределения БИС ЗУ по числу неисправных столб-

цов в целом не отличался от распределения по количеству дефектных строк q_c .

На рис. 3 представлены усеченные гистограммы распределения кристаллов по наибольшему числу $q_{э,с}$ неисправных элементов в строках накопителя. Для начального этапа исследований характерно преобладание БИС с пятью и более неработоспособными ЭЭ в строке, на третьем этапе более половины всех дефектных БИС имели по 1–2 неисправным ЭЭ в строке.

Для выявления отказавших ЭЭ и определения типов наиболее характерных эксплуатационных отказов полностью и частично годные БИС ЗУ подвергались электро- и термотренировке (ЭТТ – кратковременное воздействие питающих напряжений, отличных от номинального, при повышенной и пониженной температурах). Частично годные устройства имели либо единичные производственные отказы ЭЭ, либо строчные (столбцовые), когда в строке (столбце) накопителя неисправными являлись четверть всех или более ЭЭ.

В табл. 2 представлены обобщенные результаты части исследований, касающихся полностью годных БИС (производственные отказы ранее выявлены не были). Анализ показывает, что с течением времени в производстве БИС интенсивность отказов строк и столбцов ЭЭ практически не менялась. Происходило своеобразное перераспределение между БИС, в которых появлялись отказы одиночных ЭЭ, с одной стороны, и устройствами полностью функционально пригодными – с другой.

Т а б л и ц а 1

Отношения экспериментальных результатов к расчетным (биномиальный закон) для трех этапов эксперимента

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
I	10^4	$7 \cdot 10^3$	500	200	200	70	7	5	1,1	0,7	0,1	0,3	0,1	0,7
II	300	80	2,1	0,7	0,2	0,1	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
III	70	10	1,4	0,9	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,5

Т а б л и ц а 2

Распределение (%) БИС ЗУ по типам эксплуатационных отказов

Этап	I	II	III
Одиночный отказ	47,5	55,0	57,5
Строчно-столбцовый отказ	37,5	35,0	35,0
Отказ всей БИС	15,0	10,0	7,5

Характеристики каждого из трех типов эксплуатационных отказов в исследуемой БИС ЗУ и в других устройствах полупроводниковой памяти примерно одинаковы [5].

Вторая часть эксперимента, связанного с ЭТГ, заключалась в изучении эксплуатационных отказов в частично годных БИС (на кристалле имелись производственные отказы). В этом случае фиксировались одиночные, строчно-столбцовые и полные отказы. Во всех случаях полный эксплуатационный отказ наступал в тех БИС, накопители которых имели несколько полностью дефектных строк либо столбцов ЗЭ. В среднем в 75 из 100 случаев появления строчно-столбцовых отказов эти строки или столбцы содержали несколько производственных отказов. В строках с одиночными производственными отказами эксплуатационные отказы других элементов не обнаружены. Это же характерно и для кристаллов, в которых имелись одиночные производственные отказы ЗЭ, но расположенные не рядом.

Выводы

По мере совершенствования конструкции БИС и технологического процесса ее изготовления характер распределения дефектов на кристалле меняется от ярковыраженного группирования по площади к статистической независимости.

Отказы в процессе эксплуатации частично годных БИС ЗУ чаще возникают в тех зонах кри-

сталла, которые имеют дефекты производства.

Полученные статистические результаты позволили рассчитать прогнозируемый объем аппаратной избыточности в БИС ЗУ информационной емкостью 16 К и определить принцип построения избыточных (резервных) схем в этом устройстве. На начальном этапе производства отмеченной БИС посредством замены отказавших строк на резервные (всего 4) выход функционально годных (в том числе и полностью бездефектных) устройств увеличен примерно в 3 раза [6].

Несмотря на то, что в настоящее время промышленностью освоен выпуск БИС ЗУ информационной емкостью, в десятки и сотни раз превышающей информационную емкость исследованного устройства, учет полученных закономерностей распределения неисправностей на кристалле способствует улучшению технологичности и надежности современных БИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конопелько В.К., Лосев В.В. Надежное хранение информации в полупроводниковых запоминающих устройствах.— М.: Радио и связь, 1986.— С.270.
2. Stapper S.H., Rosen R.J. A simple method for modeling VLSI yields.— IEEE J. Solid-State Circ.— 1982.— V.25, N 6.— P.487—494.
3. Stapper S.H. On yield, fault distributions and clustering of particles.— IBM J. Research and Development.— 1986.— V.30, N 6.— P.326—338.
4. Урбанович П.П., Конопелько В.К., Лосев В.В., Сухопаров А.И. Статистические характеристики распределения отказов в кристаллах полупроводниковых запоминающих устройств // Изв. вузов СССР. Сер. Приборостроение.— 1983.— Т. XXVI, № 1.— С.92—95.
5. Лосев В.В., Бородин Г.А., Гарбузов Н.И., Конопелько В.К. Обнаружение и исправление ошибок в полупроводниковых запоминающих устройствах при помощи корректирующих кодов // Зарубежная электронная техника.— 1986.— № 3.— С.57—84.
6. Верниковский Е.А., Конопелько В.К., Попов Ю.П., Сухопаров А.И. Статическое ОЗУ К541РУЗ емкостью 16К // Электронная промышленность.— 1986.— № 2.— С.11—12.

Статья поступила 23 апреля 1987 г.