

А. М. ВАНТЕЕВ, д. т. н. А. И. КОРОБОВ

Россия, Московский авиационный институт  
E-mail: vanteev@tekon.ru

Дата поступления в редакцию  
06.02 — 29.11 2002 г.

Оппонент к. т. н. Л. Д. БУЙКО  
(ГЦ "Белмикрoанализ", г. Минск)

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБИС ПО СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЕЕ СТРУКТУРЫ

*Качество операций технологического процесса можно оценить по результатам испытаний элементов физической структуры СБИС, формируемых на аттестуемых операциях.*

Характеристики качества процесса изготовления современных СБИС — точность операций и привносимую на них дефектность — оценивают методом тестовых схем по результатам измерения параметров элементов физической структуры СБИС, формируемых на аттестуемой операции [1]. Использование этой информации позволяет выработать управляющие воздействия, направленные на снижение технологических потерь параметрического и катастрофического характера.

В то же время имеют место технологические потери при сборке изделий в корпусе ( $C_{сб}$ ) и отказы собранных СБИС в эксплуатации ( $C_{экс}$ ). Указанные потери и отказы обуславливают часть себестоимости, названную себестоимостью эксплуатации [2]. Ее величина может быть определена как

$$C_{сб} = (\Delta n / \Delta t) t \text{ или } C_{экс} = C_{отк} \lambda t,$$

где  $\Delta n / \Delta t$  — интенсивность отказов при сборке;

$C_{отк}$  — стоимость отказа;

$\lambda$  — интенсивность отказов СБИС в эксплуатации;

$t$  — время, за которое определяется  $C_{экс}$ .

Величина  $C_{отк}$  зависит от этапа его обнаружения и от целевого предназначения аппаратуры, в которой применяются СБИС. Эта зависимость иллюстрируется в табл. 1 [1].

Для снижения себестоимости эксплуатации необходима разработка управляющих воздействий для корректировки технологических операций, формиру-

Таблица 1

Зависимость стоимости отказа от этапа его обнаружения и целевого назначения аппаратуры

Целевое назначение	Стоимость отказа (в долларах США)			
	При входном контроле	При монтаже блока	При испытаниях	В условиях эксплуатации
Широкого потребления	2	5	5	50
Промышленная	4	26	45	215
Военная	7	50	120	1000
Космическая	15	75	300	$2 \cdot 10^8$

ющих соответствующие элементы физической структуры СБИС, параметры которых характеризуются потенциальной нестабильностью. Для выработки таких управляющих воздействий необходимо, в свою очередь, получить характеристики потенциальной стабильности или нестабильности элементов физической структуры СБИС. Этой цели посвящена настоящая работа, для чего использовались метод тестовых схем и метод ускоренных испытаний.

При проектировании тестовых схем учитывали, что физическая структура СБИС состоит из четырех групп элементов: транзисторов, проводников, контактов, изоляций. Процессы, происходящие в проводниках, контактах и изоляциях, приводят, как правило, к катастрофическим отказам СБИС (исключение составляют некоторые процессы, приводящие к увеличению времени задержки сигнала в цепях коммутации, обуславливаемых постепенным ростом сопротивления и емкости проводников). Процессы, происходящие в транзисторах, приводят к возникновению как катастрофических, так и параметрических отказов. Если учесть, что деградиционные процессы проявляются, в первую очередь, как следствие загрязнений физической структуры, то по параметрам деградации этих элементов можно оценить такую характеристику качества операций технологического процесса как привносимая загрязняемость.

При разработке программ ускорения испытаний учитывалось, что в физической структуре СБИС могут происходить следующие деградиционные процессы:

- электромиграция ионов металла при повышенных значениях протекающего по проводнику тока;
- коррозия и окисление материала проводников металлизации в результате возникших в условиях эксплуатации электрохимических процессов;
- образование интерметаллических соединений на границах контактирующих тел в результате химических реакций;
- перемещение зарядов под воздействием электрического поля и образование инверсионных слоев;
- электрический пробой тонкого окисла;
- инжекция и захват горячих носителей и др.

Каждый из названных выше процессов описывается соответствующей физической моделью, связывающей характеристику процесса (например, скорость деградации) с факторами, определяющими условия протекания рассматриваемого процесса. Так,

в соответствии с моделью образования короткого замыкания проводников межслойной изоляции при наличии в площади их пересечения сквозной поры (см. рисунок) применима модель диффузии проводников металлизации по поверхности поры [1]. В соответствии с этой моделью время возникновения отказа короткого замыкания проводников верхнего и нижнего слоев металлизации определится как

$$t_{кз} = (((1 - y^2)d_0)/D_0\alpha^2)\exp(-E_\alpha/KT),$$

где  $y$  — отношение эксплуатационного (рабочего) напряжения к первоначальному напряжению пробоя;

$d_0$  — толщина диэлектрического слоя;

$D_0$  — коэффициент диффузии материала электрода по поверхности сквозной поры;

$\alpha$  — постоянный коэффициент;

$E_\alpha$  — энергия активации процесса диффузии;

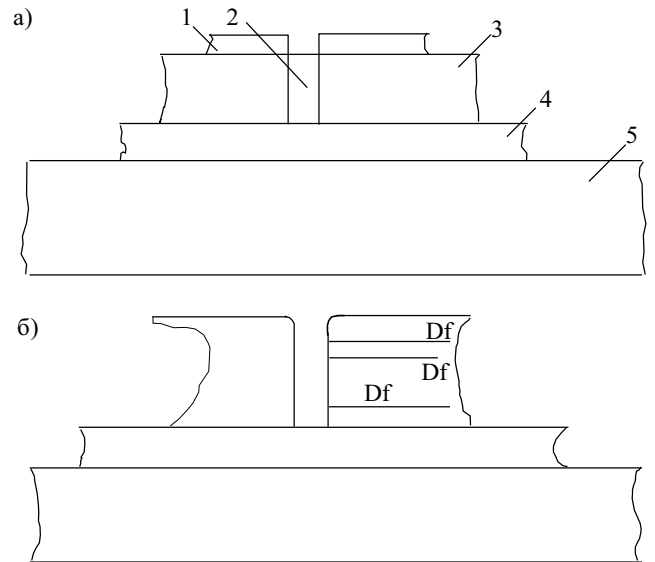
$K$  — постоянная Больцмана;

$T$  — абсолютная температура контакта.

В качестве критерия отказа может быть принято равенство напряжения пробоя в момент времени  $t_{пр}$  рабочему напряжению между изолированными проводниками металлизации.

Используя температуру как фактор, ускоряющий процесс диффузии материала электрода, можно выявить образцы (партий пластин), где значение  $t_{пр}$  меньше по сравнению с другими партиями, попытаться установить причину такого различия и выбрать управляющее воздействие.

В табл. 2 [3] приведены модели, относящиеся к деградиционным процессам: коррозии алюминиево-



Модель образования короткого замыкания при наличии сквозной поры в диэлектрике:

$a$  — начальный момент времени  $t$ ;  $b$  — промежуточный момент времени; 1, 4 — проводники металлизации верхнего и нижнего уровней; 2 — сквозная пора; 3 — межслойная изоляция; 5 — толстый окисел

го проводника при его взаимодействии с внешней средой; электромиграции кремния в алюминий; дрейфа ионов в тонком окисле, приводящего к его пробоя; электродиффузии ионов алюминия под действием энергии электронов при больших плотностях тока и др. Указанные (и другие) модели рассматривались как основание для проектирования элементов тестов-

Таблица 2

Механизмы деградации в некоторых элементах физической структуры СБИС и модели этих механизмов

Механизмы деградации	Модель механизма
Коррозия Al проводника металлизации, вызванная диффузией кислорода по границе зерен	Средняя наработка до отказа алюминиевой дорожки $\tau_{ср} = K_{экс}(-E_\alpha/KT)p^{-\alpha}$ , где $K_{экс}$ — постоянная, определяемая по результатам испытания тестовых структур; $-E_\alpha$ — энергия активации процесса для диффузии кислорода (паров воды) по границе зерен ( $E_\alpha = 0,5$ эВ)
Отказ контакта Al проводника к кремнию, вызываемый протеканием процесса электромиграции кремния в алюминий	Средняя наработка до отказа контакта Al $\tau_{ср} = Aj^{-1}d \exp((-w/l) + (-E_\alpha/KT))$ , где $A$ — коэффициент, определяемый по испытаниям тестовых структур; $j$ — плотность тока, протекающего через контакт «алюминий—кремний», А/см <sup>2</sup> ; $d$ — ширина Al проводника, см; $w$ — коэффициент, зависящий от размеров зерен, определяемый по результатам испытаний тестовых структур, см; $l$ — длина алюминиевого проводника, см
Пробой тонкого окисла под затвором по механизму дрейфа ионов	Средняя наработка до отказа МДП-конденсатора $\tau_{ср} = (L^2 / D) \left[ j_{ср} - b\sqrt{(u/t)} - hj^u uRtAS / \Delta TL \right]$ , где $L$ — толщина окисла; $D = 10^{-20}$ см/с — коэффициент диффузии ионов в окисле; $u$ — напряжение, приложенное к затвору, В; $T$ — температура тонкого слоя окисла и окружающей среды; $S$ — площадь поперечного сечения канала
Разрыв цепи алюминиевого проводника по механизму электродиффузии	Средняя наработка до отказа $\tau = Kj^{-n} \exp(E/(nt))$ , где $K$ — константа, зависящая от материала пленки, ее структуры, ширины и длины дорожки проводника; $j$ — плотность тока, А/см <sup>2</sup> ; $n$ — показатель степени, равный 1, когда отказы определяются преимущественно структурой пленки; равный 3, если доминирует градиент температуры; $E$ — энергия активации процесса

вых схем, отображающих элементы физической структуры реальной СБИС, в частности, проводников, контактов, структур МДП и др., а также для выбора режимов ускоренных испытаний этих элементов.

Измерения проводились на тестовых элементах, входящих в модули тестовых схем (по пяти модулей на каждой пластине). Оценивалось качество операций формирования алюминиевой металлизации и формирования контактов Al— $n^+$ , Al— $p^+$ , Al—полукремний.

В качестве тестовых элементов использовались:

— Al шина одиночная, имеющая токовые и потенциальные выводы соответственно  $L=1000$  мкм,  $B=1$  мм;

— две параллельных Al шины на рельефе, образованном ступеньками тонкого и толстого окисла на Si;  $L=5000$  мкм;

— цепочки контактов Al проводника к областям  $n^+$  в количестве 1000 шт., размеры контактного окна  $2 \times 2$  мкм;

— цепочки контактов Al проводника к областям  $p^+$  в количестве 1000 шт., размеры контактного окна  $2 \times 2$  мкм.

В табл. 3 приведены результаты оценки величины среднего значения дрейфа сопротивления тестового элемента — проводника металлизации — для разных изделий. Усреднение производилось по количеству пластин.

Таблица 3  
Деградация сопротивления Al проводника (металлизация на рельефе)

Количество пластин	Значение $\overline{\Delta R/R}$
52	0,46
18	0,20
22	0,10
42	0,14
14	0,20
9	0,05
15	0,10

Деградацию контактов проводника алюминиевой металлизации к области  $n^+$ ,  $p^+$  и полукремниевому проводнику (Si- $n$ ) определяли по изменению величины сопротивления контакта во время испытаний. Для оценки влияния переходного сопротивления контактов на величину его изменения при испытаниях определяли коэффициент парной корреляции средней величины сопротивления контакта до испытания тестового элемента ( $R_{cp}$ ) и средней величины этого дрейфа ( $\overline{\Delta R/R}$ ). Полученные данные приведены в табл. 4, где X — для 30% контактов  $\overline{\Delta R/R}$  меньше 20%, Xx — для 25% контактов величина деградации больше 10%.

Полученные результаты свидетельствуют о различии скорости деградационных процессов проводников металлизации в различных партиях. Так, если принять нормальным разброс величины ухода сопро-

Таблица 4

Деградация сопротивления контактов Al к областям  $n^+$ ,  $p^+$  и пленке полукремния Si- $n$

Номер партии	Количество партий	Al— $n^+$		Al— $p^+$		Al—Si- $n$	
		$\overline{\Delta R/R}$	$R_{cp}$	$\overline{\Delta R/R}$	$R_{cp}$	$\overline{\Delta R/R}$	$R_{cp}$
1	52	-1,9	-0,76	0,1	-0,53	-0,1	X
2	18	-2,4	-0,68	4,7	-0,72	-0,26	X
3	22	-2,4	-0,79	0,1	-0,92	-0,27	X
4	42	-1,8	-0,74	0,03	-0,89	-0,1	X
5	14	-3,0	-0,9	0,1	-0,55	-1,3	Xx
6	15	-17,0	-0,88	0,1	-0,25	-0,7	X

тивления в пределах 0,05...0,2 (т. е. укладываемый в пределы распределения  $\overline{\Delta R/R}$ ), то партия, в которой величина дрейфа сопротивления "Al — полупроводник" вдвое превышает значение максимального предела дрейфа сопротивления, характеризуется потенциально ненадежными элементами металлизации. Последнее свидетельствует о необходимости анализа операций, формирующих проводники металлизации, и выработки соответствующих управляющих воздействий.

По данным табл. 4 можно выделить потенциально ненадежные элементы физической структуры контактов Al —  $n^+$  в партии 6 и контакт Al — Si- $n$  в партии 5. Отметим отсутствие корреляции первоначального значения сопротивления контакта с величиной его дрейфа на испытаниях, что свидетельствует о невозможности выявления нестабильных элементов по их первоначальным значениям функционального параметра.

### Выводы

Качество операций технологического процесса можно оценить по результатам испытаний элементов физической структуры СБИС, формируемых на аттестуемых операциях. Деградацию параметров этих элементов при испытаниях, проводимых в форсированных режимах, можно проводить на специально спроектированных тестовых элементах.

Испытания таких элементов как Al проводники, цепочки контактов Al —  $n^+$ , Al —  $p^+$ , Al — Si- $n$  позволяют выявить партии, подвергшиеся загрязнению или другому воздействию, по существенному отличию измеряемого параметра от максимального значения разброса этой величины среди нескольких партий, сформированных по стандартному технологическому процессу.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры. В. Е. Власов, В. П. Захаров, А. И. Коробов / Под. ред. А. И. Коробова. — М. Радио и связь, 1987.
2. Архипцов К. А., Михайлов Д. Е. Себестоимость как критерий технологичности ИС и МЭА // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. — 1999. — Вып. 1.
3. Воробьев В. А. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств. — М.: Наука, 1989.