

Д. т. н. С. В. ЛЕНКОВ, Э. А. ФИШЕР, В. В. ЗУБАРЕВ

Украина, г. Одесса, г. Киев

Дата поступления в редакцию  
05.12.1996 г.

Оппонент д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ

## АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОТКАЗОВ ДЕФЕКТНЫХ ИЭТ

*Проанализированы процесс и модели отказов ИЭТ из-за механических напряжений и диффузионных процессов.*

*The process and the models of EEA (electronic engineering articles) failures because of stress and diffusion processes have been analysed.*

Надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в настоящее время зависит главным образом от так называемых «ранних» (прирабочных) отказов комплектующих ее изделий электронной техники (ИЭТ). Обеспечение безотказности РЭА затруднено недостаточной изученностью возможных механизмов подобных отказов, что, в свою очередь, обусловлено сложностью взаимодействия всей совокупности факторов, стимулирующих процессы деградации электронных структур. Поэтому для предотвращения эксплуатационных отказов ИЭТ в составе РЭА необходима разработка моделей отказов ИЭТ на основе глубокого изучения механизмов их деградации. Такие модели позволят, во-первых, по результатам испытаний идентифицировать дефекты и механизмы деградации ИЭТ, во-вторых, оптимизировать режимы технологических тренировочных прогонов ИЭТ и РЭА.

К настоящему времени различными авторами предложено ряд физических моделей, описывающих процессы деградации и отказов ИЭТ [1–3 и др.]. В их основу положена зависимость скорости процесса от температуры, предложенная Аррениусом для элементарных химических реакций. Однако применение модели Аррениуса при оценках надежности ИЭТ дает результаты, существенно отличающиеся от реальных [4–6], что вызывает необходимость создания принципиально новых моделей.

Многолетний опыт авторов по исследованию причин и механизмов отказов ИЭТ в составе РЭА позволяет сделать вывод о том, что преобладающими механизмами отказов ИЭТ являются следующие [7, 8]:

– разрушения структуры полупроводниковых приборов, инициированные механическими напряжениями;

– деградация структур из-за диффузионных процессов;

– пробой диэлектриков из-за локального превышения допустимых значений напряженности электрического поля в областях дефектов;

– разрушения пленочных проводниковых и резистивных элементов в областях дефектов, приводящие к локальному превышению допустимых значений плотности тока.

В настоящей статье рассматриваются результаты моделирования первых двух из перечисленных механизмов отказов ИЭТ.

Механические напряжения в структурах ИЭТ обусловлены воздействием температуры и ее градиентом в процессе производства, климатических испытаний и эксплуатации. Характер распределения механических напряжений зависит от технологических режимов, свойств материалов, конструкции ИЭТ и их корпусов. При эксплуатации аппаратуры эти напряжения могут усиливаться или уменьшаться в зависимости от условий работы. Большинство технологических процессов изготовления полупроводниковых приборов являются высокотемпературными, поэтому при охлаждении до температуры окружающей среды в кристаллах приборов неизбежно возникают термомеханические напряжения. Часть их снимается за счет пластических деформаций, но значительная часть напряжений остается. Под воздействием механических напряжений в каждом из конструктивных элементов и на границах их раздела происходят изменения электрофизических свойств материалов, что вызывает изменения параметров полупроводниковых приборов. Установлено, например, что напряжения порядка 10 МПа приводят к изменению номинального сопротивления резисторов на 1% [9, с. 11; 10, с. 65]. В то же время при механической прочности пластин кремния порядка 175 МПа механические напряжения кристалла после сборки могут достигать 90 МПа. После операций монтажа кристаллов и термокомпрессионной микросварки возникают механические напряжения, достигающие 100 МПа [10].

Источником механических напряжений являются и различного рода дефекты структуры. С каждой краевой дислокацией связаны области растяжения и сжатия в кристалле, дислокационная сетка приводит к появлению поля знакопеременных напряжений, а скопление дислокаций – к суммированию напряжений растяжения по одну сторону скопления, и сжатия – по другую. Упругая деформация влияет на электрофизические параметры полупроводника: ширину запрещенной зоны, концентрацию неосновных носителей заряда, подвижность электронов и др. Очень чувствительны к деформации обратный ток  $p-n$ -перехода и напряжение пробоя.

Механические напряжения ускоряют процессы коррозии алюминиевой металлизации БИС, герметизированных пластмассой. Объясняется это действием следующего механизма: температурные напряжения, возникающие в пластмассе, повреждают слой пассивации, вследствие чего влага проникает к поверхности кристалла и вызывает коррозию алюминиевой металлизации. Разрушение пассивации происходит под действием касательных напряжений в пластмассе, которые увеличиваются от центра кристалла к периферии [11, с. 200].

Таким образом, установлено, что механические напряжения оказывают существенное влияние на процессы деградации и отказов полупроводниковых структур. Одним из основных факторов такого влияния, очевидно, может быть возникновение под действием механических напряжений локальных изменений напряженности электрического поля, которые приводят к снижению электрической прочности изоляторов и обратносмещенных  $p-n$ -переходов, а у прямосмещенных переходов и в транзисторных структурах — к локальному увеличению плотности тока. При этом снижение электрической прочности и локальное увеличение плотности тока связаны линейной зависимостью с деформациями, т. к. напряженность электрического поля при фиксированной разности потенциалов линейно зависит от ширины соответствующей области.

Для создания модели отказов ИЭТ, в частности полупроводниковых структур, под действием механических напряжений целесообразно воспользоваться моделью зависимости между упругими напряжениями и деформациями. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что для большинства твердых тел зависимость между деформациями и напряжениями является нелинейной.

Предположив, что значения механических напряжений в партии однотипных приборов распределены по нормальному закону и в соответствии с правилами нахождения закона распределения случайной величины, получим следующую зависимость для плотности распределения наработки до отказа  $t_0$ :

$$f_{t_0}(t) = \frac{1}{m\sqrt{2\pi}\sigma_{t_0}^{\frac{1}{m}}} \exp\left(-\frac{t^{\frac{1}{m}}}{2\sigma_{t_0}^{\frac{2}{m}}}\right)$$

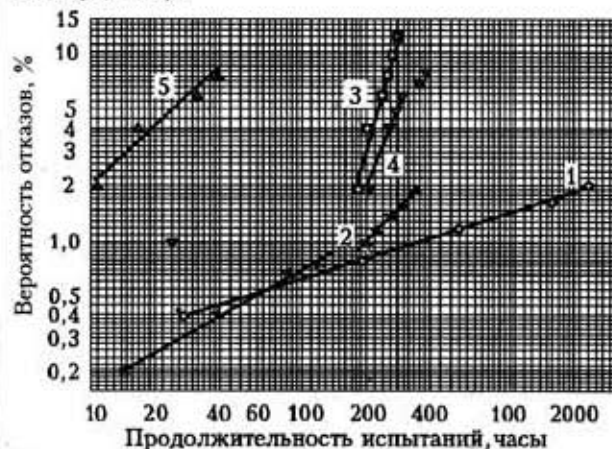
Полученное распределение применительно к ненадежным элементам на период приработки может быть аппроксимировано распределением Вейбулла [12]. Адекватность модели Вейбулла реальным процессам деградации и отказов дефектных элементов подтверждена многими специалистами.

Результаты анализа позволяют сделать обобщающий вывод о том, что при наличии степенной функциональной зависимости параметра, определяющего надежность изделия, от какого-либо одного влияющего фактора (при нормальном распределении значений этого фактора) процессы деградации и отказов элементов во время приработки (когда оно значительно меньше средней наработки до отказа) хо-

рошо аппроксимируются распределением Вейбулла. Это относится и к нередким случаям, когда деградация и отказы ИЭТ обусловлены процессами диффузии, протекающими неконтролируемо при эксплуатации изделий.

Такой процесс, например, имеет место при наличии ионных загрязнений, диффундирующих через окисел и приводящих к возникновению отказов МОП-структур из-за зарядовой нестабильности.

В целях получения данных о реальных закономерностях отказов в условиях эксплуатации полупроводниковых приборов широкого применения использованы данные о динамике отказов отдельных типов ИЭТ в процессе технологических тренировочных прогонов и испытаний на надежность телевизионных приемников. Под наблюдением были взяты наиболее часто отказывающиеся ИЭТ: транзисторы типа КТ838А в составе модуля строчной развертки (250 шт.); тиристоры типа КУ112 в составе модуля питания (100 шт.); ГИС усилителей промежуточной частоты звука (УПЧЗ) (500 шт.); ИС типа К174УН7 усилителя мощности звуковой частоты (50 шт.).



Распределение отказов типовых биполярных приборов (вероятностная сетка для распределения Вейбулла): 1 — транзисторы КТ838А (нормальные условия окружающей среды); 2 — микросборки УПЧЗ; 3 — микросхемы 174УН7; 4 — тиристоры КУ112; 5 — транзисторы КТ838А (режим термоциклирования)

Результаты испытаний приведены на рисунке. Здесь видно, что распределение отказов для ИЭТ всех типов достаточно хорошо аппроксимируется отрезками прямых линий, отображающими теоретические распределения Вейбулла. Выпадает из этой картины лишь одна экспериментальная точка в распределении для тиристоров типа КУ112. Последующий физико-технический анализ (ФТА) показал, что отказ тиристора в этом случае носил зависимый характер и был обусловлен отказом мощного транзистора. Поэтому этот отказ в дальнейшем не учитывался. График распределения отказов УПЧЗ имеет вид ломаной линии. Однако следует иметь в виду, что УПЧЗ представляет собой ГИС, в состав которой входят несколько различных элементов. Как показал последующий ФТА, здесь имели место два различных вида и механизма отказов.

Соответствие полученных экспериментальных распределений теоретическому распределению Вейбулла было проверено и подтверждено с помощью критерия согласия Колмогорова [13].

\*\*\*

Результаты исследований дают возможность обоснованно подойти к решению задачи выявления скрытых дефектов ИЭТ и оптимизации режимов технологических тренировочных прогонов РЭА.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Towner Janet M. Electromigration-induced short circuit failure — 23-rd annual proceeding reliability // Phys. March 26–28. — 1985. — New York. — P. 81–86.
2. Sebastian B. Predict transistor failor due to metal wearont // Microwaves and RF. — 1985. — Vol. 24, N 12. — P. 69–71.
3. Власов В. Е., Захаров В. П., Коробов А. И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры / Под ред. А. И. Коробова. — М.: Радио и связь, 1987.
4. O'Connor P. D. T. Reliability prediction. Help or hoax? // Solid state technology. — 1990. — Vol. 33, N 8. — P. 97.
5. Charles Leonard, MIL HDBK-217: It's time to rethink it — ED // Boeing commercial airplane group, Box 3707 Mail Stop 6U-EP, Seattle, WA 98 128, (206) 477-0278. — 1991. — N 20. — P. 79.
6. Hakin E. B. Reliability predictions: IS Arrenius emoons? // Solid state technology. — 1990, N 8. — P. 37.
7. Ленков С. В., Зубарев В. В., Тариелашвили Г. Т. Физико-технический анализ причин отказов ЭРИ в составе РЭА // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 3. — С. 31–33.
8. Ленков С. В., Фишер З. А. Надежно-ориентированное управление технологией производства РЭА // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1993. — № 2. — С. 3–5.
9. Сергеев В. С., Кузнецов О. А., Захаров Н. П., Летягин В. А. Напряжение и деформации в элементах микросхем. — М.: Радио и связь, 1987.
10. Леонов Н. Н., Ковшиков Е. К. Влияние механических напряжений, возникающих на сборочных операциях, на качество и надежность микросхем // Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1987. — Вып. 3.
11. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на уровень остаточных напряжений в кристалле БИС в процессе производства: Отчет о НИР «Евфрат», МИЭТ; № ГР01850033857. — М. — 1985.
12. Беккер П., Йенсен Ф. Проектирование надежных электронных схем / Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Сов. радио, 1977.
13. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных: Справочное изд. — М.: Финансы и статистика, 1983.

### Научно-технический журнал

## «Технология и конструирование в электронной аппаратуре»

(Краткая справка)

Основан в 1977 г. на базе Научно-исследовательского технологического института «Темп» как отраслевой научно-технический сборник Министерства промышленности средств связи СССР «Техника средств связи. Серия Технология производства и оборудование» (Одесская редакция). Серия издавалась совместно с Московской редакцией (Центральный научно-исследовательский технологический институт).

В 1991 г. зарегистрирован как средство массовой информации СССР с учредителем НПО «Темп» (г. Одесса). С названием «Технология и конструирование в электронной аппаратуре» вошел в каталог «Союзпечати» под индексом 71141. С этим индексом входит в украинский и российский подписные каталоги периодических изданий, а также в каталог фирмы «Периодика» АО «Международная книга» (г. Москва).

В 1992 г. зарегистрирован как средство массовой информации Украины.

В 1996 г. перерегистрирован с учредителем ОАО «Нептун» (г. Одесса).

В 1994 и 1996 гг. не выходил.

Международный стандартный серийный номер ISSN 0130-6243.

Включен в Каталог специальных изданий и издательств Европы (г. Берлин).

Входит в перечень журналов, публикации в которых учитываются ВАК при соискании ученой степени кандидата и доктора наук.

1977–1998