

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПОИСКА ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Казюциц В.О., Шнейдеров Е.Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Боровиков С.М. – канд.техн.наук, доцент

Аннотация. Для индивидуального прогнозирования надёжности мощных полупроводниковых приборов необходимо знать информативные параметры, их поиск выполняют с помощью экспериментальных исследований. Для транзисторов большой мощности типа КП744А были измерены электрические параметры, которые предположительно могут оказаться информативными. Выполненный корреляционный анализ параметров позволил сократить их число и тем самым упростить дальнейшие экспериментальные исследования транзисторов при проведении их ускоренных испытаний на надёжность, а также определить параметры, которые просты в измерении и заметно коррелированы с тепловым сопротивлением кристалл-корпус – параметром, являющимся информативным для полупроводниковых приборов большой мощности, но неудобным для измерения при проведении процедуры прогнозирования надёжности приборов.

Ключевые слова: надёжность, транзисторы большой мощности, индивидуальное прогнозирование, информативные параметры, корреляционный анализ, ускоренные испытания.

Материалы доклада подготовлены по результатам выполнения проекта № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надёжности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения», утверждённого Научным советом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований 22 апреля 2020 года по результатам конкурса «БРФФИ–Минобразование М-2020». Проект выполняется в 2020-2022 годах кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем в лаборатории научно-исследовательской группы 5.1 «Методы проектирования, испытания и программирования надёжности электронных систем» научно-исследовательской части (НИЧ) Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Введение. Одним из способов повышения надёжности электронной аппаратуры является постановка в неё элементов повышенного уровня надёжности. Эта процедура для мощных полупроводниковых приборов является актуальной, поскольку тепловая нагрузка на кристалл повышает вероятность преждевременного отказа приборов в составе аппаратуры. Известно [1], что отбор экземпляров повышенного уровня надёжности может быть выполнен с помощью индивидуального прогнозирования по информативным параметрам. Причём информативные параметры контролируются (измеряются) у конкретного экземпляра в начальный момент времени (до постановки полупроводникового прибора в электронное устройство) и по их значениям прогнозируют безотказную работу этого экземпляра в течение заданной наработки. Для решения задачи индивидуального прогнозирования надёжности полупроводниковых приборов данного типа надо знать их информативные параметры.

Поиск информативных параметров выполняют обычно с помощью экспериментальных исследований. Первым этапом таких исследований является измерение в начальный момент времени у каждого экземпляра определённой выборки полупроводниковых приборов интересующего типа таких электрических параметров, которые гипотетически могут оказаться информативными. Указанную выборку называют обучающей, её объём составляет примерно 60...200 экземпляров. А окончательное решение об информативности параметров принимают по результатам испытаний этой выборки полупроводниковых приборов на надёжность при длительной наработке. Обычно проводят ускоренные, как правило, форсированные испытания,

позволяющие за относительно короткое время получить о полупроводниковых приборах ту же информацию о надёжности, что и при длительной наработке в обычных нормальных условиях.

Основная часть. Ставилась задача по поиску информативных параметров применительно к полевым транзисторам большой мощности типа КП744А. Объём обучающей выборки составлял 200 экземпляров. Был выполнен первый этап исследований, предусматривающий измерение электрических параметров, которые предположительно могут быть информативными для транзисторов исследуемого типа. В число измеряемых электрических параметров были включены не только электрические параметры, нормируемые в технических условиях, но и специфические параметры, которые даже не упоминаются в технической документации или справочниках, например добротность ёмкости перехода затвор-сток. При выполнении измерений были приняты во внимание предельно допустимые значения параметров исследуемых полевых транзисторов (таблица 1).

Таблица 1 – Предельно допустимые параметры транзисторов типа КП744А [2]

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Предельное значение
Напряжение сток-исток	$U_{си\ max}$	В	100
Напряжение затвор-исток	$U_{зи\ max}$	В	-20...+20
Постоянный ток стока	$I_{с\ max}$	А	9,2
Импульсный ток стока.	$I_{с. и\ max}$	А	37
Рассеиваемая мощность	P_{max}	Вт	60
Прямой ток диода	$I_{пр. max}$	А	9,2
Температура перехода	$T_{пер}$	°C	175

Измерение большинства электрических параметров исследуемых транзисторов выполнялось на сертифицированных измерительных установках «ИНЕЙ» и «ГАММА» в испытательном центре ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Результаты измерений электрических параметров были обработаны с помощью инструмента «Корреляция» пакета «Анализ данных» приложения Microsoft Excel. Итоги обработки отображаются в виде корреляционной матрицы параметров, которая является симметричной относительно своей единичной диагонали, поэтому приводится только её нижняя часть.

Таблица 2 является фрагментом (частью) полученной корреляционной матрицы. В таблицу включено девять параметров, прежде всего те, которые наиболее заметно коррелированы с тепловым сопротивлением кристалл-корпус $R_{t\ кр-корп}$ – параметром, являющимся информативным для полупроводниковых приборов большой мощности, но измерение которого усложняет процедуру прогнозирования и увеличивает её длительность при получении прогноза надёжности приборов.

Таблица 2 – Корреляционная матрица параметров

Параметр	$U_{обр}$	$R_{обр}$	$U_{зи. пор}$	$U_{пр}$	$R_{си. отк}$	$R_{t\ кр-корп}$	$C_{зс}$	$Q_{C.зс}$	$C_{зи}$
$U_{обр}$	1								
$R_{обр}$	0,261	1							
$U_{зи. пор}$	0,801	-0,129	1						
$U_{пр}$	0,215	0,957	-0,173	1					
$R_{си. отк}$	0,316	0,942	-0,043	0,868	1				
$R_{t\ кр-корп}$	0,568	-0,334	0,684	-0,320	-0,315	1			
$C_{зс}$	-0,739	-0,011	-0,787	0,093	-0,166	-0,468	1		
$Q_{C.зс}$	0,692	-0,129	0,830	-0,201	-0,008	0,553	-0,888	1	
$C_{зи}$	-0,429	0,162	-0,581	0,213	0,089	-0,431	0,590	-0,563	1

В таблице 3 приводятся пояснения параметров, включённых в таблицу 2

Таблица 2 – Пояснение параметров корреляционной матрицы

Обозначение параметра	Пояснение	Размерность	Режим измерения
-----------------------	-----------	-------------	-----------------

$U_{обр}$	Обратное напряжение перехода затвор-исток	В	$*I_c = -0,1 \text{ А}$
$R_{обр}$	Обратное сопротивление перехода сток-исток	МОм	$I_c = 0,1 \text{ А}$
$U_{зи. пор}$	Пороговое напряжение	В	$I_c = 250 \text{ мкА}$
$U_{пр}$	Прямое напряжение перехода сток-исток	В	$I_c = -9,2 \text{ А}$
$R_{си. отк}$	Сопротивление перехода сток-исток в открытом состоянии	Ом	$I_c = 5,5 \text{ А},$ $U_{зи} = 10 \text{ В}$
$R_{т \text{ кр-корп}}$	Тепловое сопротивление переход-корпус транзистора	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$	–
$C_{зс}$	Ёмкость перехода затвор-сток	пФ	$U_{зс} = 0$
$Q_{с.зс}$	Добротность ёмкости перехода затвор-сток	–	$U_{зс} = 0$
$C_{зи}$	Ёмкость перехода затвор-исток	пФ	$U_{зи} = 0$
*Примечания: I_c – ток стока, $U_{зи}$ – напряжение затвор-исток, $U_{зс}$ – напряжение затвор-сток			

Анализируя корреляционную матрицу (см. таблицу 2), можно убедиться, что тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{т \text{ кр-корп}}$ заметно коррелировано со следующими параметрами: обратное напряжение затвор-исток $U_{обр}$, пороговое напряжение затвор-исток $U_{зи.пор}$, ёмкость затвор-сток $C_{зс}$, добротность ёмкости затвор-сток $Q_{с.зс}$ и ёмкость затвор-исток $C_{зи}$. Принимая во внимание коэффициенты парной корреляции для указанных четырёх параметров, можно рекомендовать параметры $U_{обр}$ и $C_{зи}$ к использованию вместо параметра $R_{т \text{ кр-корп}}$.

Заключение. Для поиска информативных параметров, необходимых для прогнозирования надёжности полевых транзисторов типа КП744А, были измерены значения 20-ти электрических параметров, которые предположительно могут оказаться информативными. Выполненный корреляционный анализ позволил уменьшить число параметров, исследуемых при проведении ускоренных испытаний транзисторов на надёжность. На основе рассмотрения корреляции параметров предложено вместо параметра $R_{т \text{ кр-корп}}$ (тепловое сопротивление кристалл-корпус), являющегося для полупроводниковых приборов информативным, но усложняющим процедуру прогнозирования, использовать два других, легко измеряемых параметра.

Список литературы

1. Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники : монография / С. М. Боровиков. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
2. КП744. Мощный вертикальный п-канальный МОП-транзистор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.transistor.by/i/pdf/kp744.pdf> – Дата доступа: 14.02.2021.

UDC 621.382.33–027.45

CORRELATION ANALYSIS IN THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF SEARCH FOR INFORMATIVE PARAMETERS OF HIGH POWER TRANSISTORS

Kazyuchits V.O., Shneiderov E.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov S.M. – PhD, associate professor

Abstract. For individual prediction of the reliability of powerful semiconductor devices, it is necessary to know the informative parameters, their search is carried out using experimental research. For high-power transistors of the KP744A type, electrical parameters were measured, which presumably may turn out to be informative. The performed correlation analysis of the parameters made it possible to reduce their number and thereby simplify further experimental studies of transistors during their accelerated tests for reliability, to determine the parameters that are easy to measure and significantly correlated with the crystal-case thermal resistance. This parameter is informative for high-power semiconductor devices, but it is inconvenient to measure when performing the procedure for predicting the reliability of powerful semiconductor devices.

Keywords: reliability, high-power transistors, individual prediction, informative parameters, correlation analysis, accelerated testing.