

УДК 621.382.019.3

**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА
В КАЧЕСТВЕ ИМИТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ
ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

С.М. БОРОВИКОВ, А.И. БЕРЕСНЕВИЧ, А.В. ШАЛАК, А.В. БУДНИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 20 марта 2006*

С помощью экспериментальных исследований биполярных транзисторов для функциональных параметров (коэффициента усиления тока базы в схеме с общим эмиттером, напряжения насыщения коллектор-эмиттер) установлено наличие линейной корреляции между изменениями, обусловленными параметрами электрического режима (током коллектора, напряжением коллектор-эмиттер) как имитационных факторов, и изменениями, вызываемыми длительной наработкой транзисторов. Наличие тесной корреляции (модуль коэффициента корреляции более 0,7–0,8) является доказательством возможности использования параметров электрического режима в качестве имитационных факторов при прогнозировании постепенных отказов биполярных транзисторов методом имитационных воздействий.

Ключевые слова: полупроводниковые приборы, постепенные отказы, имитационный фактор, ток коллектора, напряжение коллектор-эмиттер, прогнозирование, статистическая аналогия.

Введение

Известно, что на долю постепенных отказов приходится до 80% всех отказов полупроводниковых приборов [1]. Эти отказы определяют понятие "параметрическая надежность", их прогнозирование является актуальной задачей. Для решения задач прогнозирования перспективным является использование метода имитационных испытаний [2–4]. При таких испытаниях полупроводниковый прибор в начальный момент времени кратковременно подвергают воздействию имитационного фактора, гипотетически обеспечивающего примерно такое же значение функционального параметра, как и его длительная наработка прибора. Используя реакцию функционального параметра прибора на имитационное воздействие, прогнозируют значение параметра и, следовательно, наличие или отсутствие постепенного отказа данного прибора для заданной будущей наработки t_3 . Считают, что испытываемый прибор для наработки t_3 будет иметь такое же значение параметра, как полученное путем измерения при наличии имитационного воздействия, уровень которого $F_{им}$ определяется исходя из этой наработки. Для пересчета наработки t_3 на значение $F_{им}$ используется функция пересчета, определяемая с помощью предварительных исследований один раз для полупроводниковых приборов интересующего типа:

$$F_{им} = f(t_3), \quad (1)$$

где f — оптимальный оператор связи наработки t с имитационным фактором F .

Метод определения функции пересчета вида (1) рассмотрен в работах [2–4] и в данной статье не обсуждается.

На практике возникает вопрос, какое воздействие выбрать в качестве имитационного фактора. Воздействие должно в начальный момент времени ($t=0$) обеспечивать такое значение функционального параметра полупроводникового прибора, которое примерно будет иметь место для заданной длительной наработки t_3 . Изменение параметра, вызываемое действием имитационного фактора, должно быть обратимым, не повреждать прибор и не вызывать расходование его рабочего ресурса.

Актуальность исследований

Традиционно в качестве имитационного фактора пытаются использовать температуру [2]. Прогнозирование функционального параметра для заданной наработки t_3 в этом случае состоит в следующем. По функции пересчета вида (1) определяют значение имитационной температуры $T_{им}$, соответствующее наработке t_3 . Испытуемый экземпляр (прибор) помещают в условия температуры $T_{им}$, выдерживают некоторое время и далее в условиях этой же температуры измеряют значение интересующего функционального параметра. Результат измерения рассматривается в качестве прогноза параметра для наработки t_3 . Для температуры как имитационного фактора характерна низкая производительность процедуры прогнозирования. При использовании температурного имитационного воздействия придется выполнять кратковременное охлаждение или же нагрев прибора до температуры $T_{им}$. На практике это может вызвать определенные проблемы. Температура как имитационный фактор имеет и другие недостатки. Например, как показано для транзисторов типа КТ872А, перепад имитационной температуры, соответствующий диапазону наработок от 0 до 20 000 ч, составляет около 17 К [4]. При погрешности поддержания имитационной температуры, равной ± 2 К, ошибка в наработке, для которой получают прогнозное значение параметра $h_{21э}$, может достигать 2 500 ч и даже более. Поэтому актуальным является поиск других, более эффективных имитационных факторов.

Применительно к биполярным транзисторам в качестве имитационного воздействия предлагалось использовать параметры электрического режима — ток коллектора или напряжение коллектор-эмиттер [5]. Однако возникает вопрос о правомерности их выбора в качестве имитационного фактора в задачах прогнозирования функциональных параметров и, следовательно, постепенных отказов биполярных транзисторов.

Методика

Для использования какого-то воздействия (температуры, электрического тока, механической нагрузки и т.д.) в качестве имитационного фактора при решении задачи прогнозирования функционального параметра полупроводниковых приборов методом имитационных испытаний, необходимо доказать, что между изменениями этого параметра, вызываемыми действием имитационного фактора, и изменениями, обусловленными длительной наработкой (деградацией функционального параметра), существует статистическая аналогия. Критерием аналогии может служить коэффициент корреляции между указанными изменениями. Если будет установлено наличие тесной корреляции между изменениями, то тем самым будет доказана возможность использования выбранного воздействия в качестве имитационного фактора для решения задач прогнозирования функциональных параметров и, следовательно, постепенных отказов полупроводниковых приборов методом имитационных испытаний [6].

Для подтверждения гипотезы о наличии тесной корреляционной связи между изменениями функционального параметра, обусловленными параметрами электрического режима, и изменениями, вызываемыми длительной наработкой биполярных транзисторов, нужно иметь три массива данных. Элементами первых двух массивов должны быть изменения функционального параметра, полученные в начальный момент времени и обусловленные соответственно сменой значений тока коллектора и изменением напряжения коллектор-эмиттер, а элементами третьего массива — изменения этого же параметра, вызванные длительной наработкой транзисторов. Указанные данные могут быть получены с помощью экспериментальных исследований выборки транзисторов объемом n . Эту выборку называют обучающей [4]. Выбор значения n в работе не рассматривается, но в любом случае должно выполняться условие $n > 20-30$.

Методика экспериментальных исследований. Формируют обучающую выборку биполярных транзисторов интересующего типа объемом n . Для транзисторов обучающей выборки вначале выполняют измерения интересующего функционального параметра (обозначим его как P) при различных значениях тока коллектора. При этом напряжение коллектор-эмиттер должно быть постоянным и соответствовать значению $U_{\text{раб}}$, выбираемому в рабочем режиме транзисторов (значению $U_{\text{кэ}}$, указываемому в технической документации). Далее выполняют измерения параметра P при различных значениях напряжения коллектор-эмиттер. Ток коллектора при этом должен быть постоянным и равным значению $I_{\text{раб}}$, соответствующему рабочему режиму транзисторов. Поскольку имитационный фактор не должен вызывать необратимые изменения функционального параметра P , то ток коллектора и напряжение эмиттер-коллектор, рассматриваемые как имитационные факторы и изменяемые при измерении P , не должны превышать предельно допустимые значения, указываемые в технической документации на биполярные транзисторы рассматриваемого типа. Затем транзисторы обучающей выборки испытывают на длительную наработку. В процессе этих испытаний изменения параметра P являются необратимыми из-за процессов деградации. Длительность испытаний t_n должна быть сопоставимой с наработкой, указываемой в документации на транзисторы.

На основе результатов эксперимента формируют три одномерных массива длиной n каждый:

$$\Delta P_i \Big|_{I_1}^{I_2}, \Delta P_i \Big|_{U_{\text{кэ}1}}^{U_{\text{кэ}2}}, \Delta P_i \Big|_{t=0}^{t=t_n}; i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

в которых значения $\Delta P_i \Big|_{I_1}^{I_2}$, $\Delta P_i \Big|_{U_{\text{кэ}1}}^{U_{\text{кэ}2}}$ и $\Delta P_i \Big|_{t=0}^{t=t_n}$ для i -го экземпляра обучающей выборки определяются по выражениям

$$\Delta P_i \Big|_{I_1}^{I_2} = P_i(I_2) - P_i(I_1), \quad (3)$$

$$\Delta P_i \Big|_{U_{\text{кэ}1}}^{U_{\text{кэ}2}} = P_i(U_{\text{кэ}2}) - P_i(U_{\text{кэ}1}), \quad (4)$$

$$\Delta P_i \Big|_{t=0}^{t=t_n} = P_i(t=t_n) - P_i(t=0), \quad (5)$$

где $P_i(I_j)$ — значение функционального параметра P i -го экземпляра, соответствующее току коллектора I_j ($j=1, 2$) при напряжении коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}}=U_{\text{раб}}=\text{const}$; $P_i(U_{\text{кэ}j})$ — значение функционального параметра P i -го экземпляра, соответствующее напряжению коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}j}$ ($j=1, 2$) при токе коллектора $I_{\text{к}}=I_{\text{раб}}=\text{const}$; $P_i(t=0)$, $P_i(t=t_n)$ — значения функционального параметра P i -го экземпляра соответственно в начальный момент времени и для наработки t_n (на момент окончания испытаний) при напряжении $U_{\text{кэ}}=U_{\text{раб}}=\text{const}$ и токе $I_{\text{к}}=I_{\text{раб}}=\text{const}$; n — объем обучающей выборки.

Определение для функционального параметра P коэффициентов корреляции между изменениями, обусловленными сменой значений тока коллектора или же сменой значений напряжения коллектор-эмиттер, и изменениями, возникающими из-за деградации в течение длительной наработки биполярных транзисторов, позволит сделать вывод о возможности использования тока коллектора или же напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационного фактора в задачах прогнозирования функционального параметра P и, следовательно, постепенных отказов транзисторов для заданных длительных наработок.

Экспериментальные исследования

Биполярными транзисторами, на примере которых выяснялась возможность использования тока коллектора или напряжения коллектор-эмиттер в качестве имитационных факторов, были выбраны мощные полупроводниковые приборы типа КТ8272В. В роли функционального параметра P , определяющего параметрическую надежность транзисторов, рассматривался статистический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером (параметр $h_{21э}$) при рабочем токе коллектора $I=0,15$ А и напряжении коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ}}=10$ В. Ставилась задача

— получить изменения параметра $h_{21Э}$, обусловленные соответственно сменой значений тока коллектора или же значений напряжения коллектор-эмиттер как предполагаемых имитационных факторов, и изменения этого параметра, вызываемые деградацией в течение длительной наработки биполярных транзисторов.

Экспериментальные исследования состояли в следующем. Случайным образом была сформирована обучающая выборка объемом 100 транзисторов указанного типа. У каждого экземпляра выборки в начальный момент времени были измерены значения $h_{21Э}$ в семи точках тока коллектора в диапазоне 0,005–1,5 А (0,005; 0,05; 0,15; 0,5; 1,0; 1,5 А). При этом напряжение коллектор-эмиттер равнялось $U_{КЭ}=10$ В, что соответствовало значению, выбранному в рабочем режиме транзисторов. Затем у каждого экземпляра выборки были измерены значения $h_{21Э}$ в семи точках напряжения коллектор-эмиттер в диапазоне 0,1–80 В (0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 10,0; 30,0; 80,0 В) при токе коллектора, равном $I=0,15$ А, что соответствовало рабочему режиму транзисторов. После этого обучающая выборка была испытана на длительную наработку. Использовались ускоренные форсированные испытания, выполняемые по типовым методам [7–9]. Время ускоренных испытаний составило 1440 ч (коэффициент ускорения 15,5), что эквивалентно наработке $t_n=22320$ ч работы в нормальных условиях: рабочая температура $T=328$ К (плюс 55°C), коэффициент электрической нагрузки по мощности $K_n=1$. В процессе испытаний в определенные моменты времени контролировалось значение $h_{21Э}$ у каждого экземпляра обучающей выборки.

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований для параметра $h_{21Э}$ были получены данные об изменениях, обусловленных параметрами электрического режима, с одной стороны, и вызываемых длительной наработкой — с другой. Из этих данных для параметра $h_{21Э}$ было сформировано несколько наборов, состоящих из массивов вида (2). В качестве ΔP рассматривались изменения $\Delta h_{21Э}$. В составленных наборах элементы массива $\Delta P_i \Big|_{t=0}^{t=t_n}$, определяемые по выражению (5), оставались неизменными, а элементами массивов $\Delta P_i \Big|_{I_1}^{I_2}$ и $\Delta P_i \Big|_{U_{КЭ1}}^{U_{КЭ2}}$ являлись значения, определяемые по выражениям (3) и (4) для различных сочетаний токов коллектора I и напряжений коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$.

Для каждого набора изменений видов $\Delta h_{21Э} \Big|_{I_1}^{I_2}$ и $\Delta h_{21Э} \Big|_{t=0}^{t=t_n}$, а также $\Delta h_{21Э} \Big|_{U_{КЭ1}}^{U_{КЭ2}}$ и $\Delta h_{21Э} \Big|_{t=0}^{t=t_n}$ были построены диаграммы разброса (корреляционные поля) и определены оценки коэффициентов линейной корреляции. В качестве примеров на рис. 1 приведена диаграмма разброса изменений $\Delta h_{21Э} \Big|_{0,005\text{ А}}^{1,5\text{ А}}$ и $\Delta h_{21Э} \Big|_{t=0}^{t=22320\text{ ч}}$, обозначенных соответственно как Δh_{21e} (1,5 А; 0,005 А) и Δh_{21e} (22320 h, 0), на рис. 2 — диаграмма разброса изменений $\Delta h_{21Э} \Big|_{0,1\text{ В}}^{80\text{ В}}$ и $\Delta h_{21Э} \Big|_{t=0}^{t=22320\text{ ч}}$, обозначенных соответственно как Δh_{21e} (80 В; 0,1 В) и Δh_{21e} (22320 h, 0).

В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициентов линейной корреляции между изменениями параметра $h_{21Э}$, обусловленными сменой значений тока коллектора (значениями элементов массива вида $\Delta h_{21Э} \Big|_{I_1}^{I_2}$), и деградационными изменениями этого параметра, возникающими в течение наработки транзисторов (значениями элементов массива $\Delta h_{21Э} \Big|_{t=0}^{t=22320\text{ ч}}$).

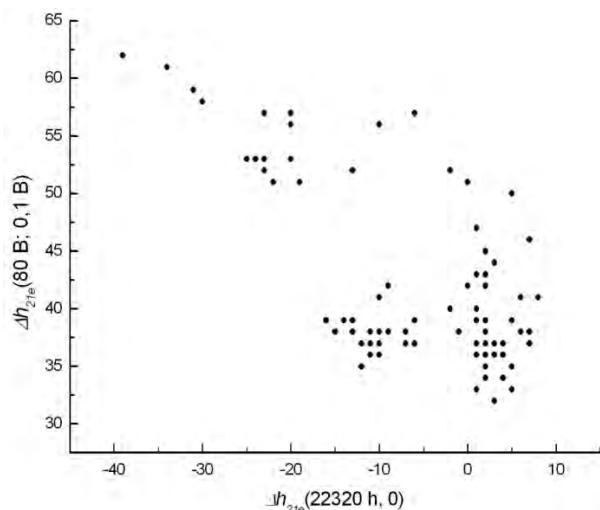


Рис. 1. Диаграмма разброса величин $\Delta h_{21э} \Big|_{0,005A}^{1,5A}$ и $\Delta h_{21э} \Big|_{t=0}^{t=22320 \text{ ч}}$

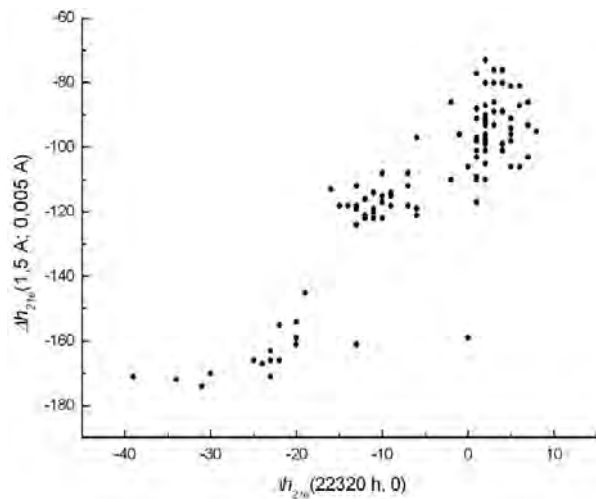


Рис. 2. Диаграмма разброса величин $\Delta h_{21э} \Big|_{0,1B}^{80B}$ и $\Delta h_{21э} \Big|_{t=0}^{t=22320 \text{ ч}}$

Таблица 1. Корреляция между изменениями параметра $h_{21э}$, обусловленными током коллектора, и деградационными изменениями в течение наработки $t_n=22\ 320 \text{ ч}$

$\Delta h_{21э} \Big _{I_1}^{I_2}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,005A}^{1,5A}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,15A}^{1,5A}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,005A}^{1A}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,005A}^{0,5A}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,005A}^{0,15A}$
Коэффициент корреляции	0,88	0,69	0,87	0,77	0,67

В табл. 2 приведены значения коэффициентов линейной корреляции между изменениями параметра $h_{21э}$, обусловленными сменой напряжения коллектор-эмиттер (значениями элементов массива вида $\Delta h_{21э} \Big|_{U_{КЭ1}}^{U_{КЭ2}}$), и деградационными изменениями этого параметра, возникающими в течение наработки транзисторов (значениями элементов массива $\Delta h_{21э} \Big|_{t=0}^{t=22320 \text{ ч}}$).

Таблица 2. Корреляция между изменениями параметра $h_{21э}$, обусловленными напряжением коллектор-эмиттер, и деградационными изменениями в течение наработки $t_n=22\ 320 \text{ ч}$

$\Delta h_{21э} \Big _{U_{КЭ1}}^{U_{КЭ2}}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,1B}^{80B}$	$\Delta h_{21э} \Big _{0,5B}^{80B}$	$\Delta h_{21э} \Big _{1B}^{80B}$	$\Delta h_{21э} \Big _{1B}^{10B}$	$\Delta h_{21э} \Big _{2B}^{80B}$	$\Delta h_{21э} \Big _{10B}^{80B}$
Коэффициент корреляции	-0,82	-0,80	-0,80	-0,70	-0,68	-0,82

Описанные выше экспериментальные исследования и корреляционный анализ изменений были выполнены также для такого функционального параметра как напряжение насыщения коллектор-эмиттер $U_{КЭнас}$, соответствующее следующему рабочему режиму: $U_{КЭ}=10 \text{ В}$, $I_K/I_B=2$, где I_K — ток коллектора; I_B — ток базы. В табл. 3 приведены рассчитанные значения коэффициентов линейной корреляции между изменениями параметра $U_{КЭнас}$, обусловленными сменой значений тока коллектора (значениями элементов массива вида $\Delta U_{КЭнас} \Big|_{I_1}^{I_2}$), и деградационными изменениями этого параметра, возникающими в течение наработки транзисторов (значениями элементов массива $\Delta U_{КЭнас} \Big|_{t=0}^{t=22320 \text{ ч}}$).

Таблица 3. Корреляция между изменениями параметра $U_{КЭнас}$, обусловленными током коллектора, и деградационными изменениями в течение наработки $t_n=22\ 320 \text{ ч}$

$\Delta U_{КЭнас} \Big _{I_1}^{I_2}$	$\Delta U_{КЭнас} \Big _{0,005A}^{1,5A}$	$\Delta U_{КЭнас} \Big _{0,15A}^{1,5A}$	$\Delta U_{КЭнас} \Big _{0,005A}^{1A}$	$\Delta U_{КЭнас} \Big _{0,005A}^{0,5A}$	$\Delta U_{КЭнас} \Big _{0,005A}^{0,15A}$
Коэффициент корреляции	0,88	0,69	0,87	0,77	0,67

Выводы

Из приведенных рис. 1, 2 и табл. 1, 2 видно, что для статического коэффициента передачи тока базы в схеме с общим эмиттером (функционального параметра $h_{21Э}$) имеет место тесная линейная корреляционная связь между изменениями $h_{21Э}$, вызываемыми сменой электрического режима (тока коллектора или напряжения коллектор-эмиттер), и деградационными изменениями $h_{21Э}$, возникающими при длительной наработке транзисторов. Корреляция имеет место для всех рассмотренных диапазонов изменения тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер.

Данные табл. 3 являются подтверждением того, что подобные закономерности характерны и для функционального параметра $U_{КЭнас}$ (напряжение насыщения коллектор-эмиттер). Для этого параметра имеет место тесная линейная корреляция связи между изменениями, обусловленными сменой тока коллектора, и деградационными изменениями $U_{КЭнас}$, возникающими при длительной наработке транзисторов.

Наличие тесной корреляции между указанными изменениями позволяет сделать выводы о возможности использования параметров электрического режима (тока коллектора или напряжения коллектор-эмиттер) в качестве имитационных факторов, с помощью которых можно (в начальный момент времени) прогнозировать функциональный параметр $h_{21Э}$ или $U_{КЭнас}$ и, следовательно, постепенные отказы биполярных транзисторов для заданных длительных работок.

CHOISE OF THE ELECTRICAL MODE PARAMETERS AS IMITATION FACTORS IN FORECASTING GRADUAL FAILURES OF BIPOLAR TRANSISTORS

S.M. BARAVIKOU, A.I. BERASNEVICH, A.V. SHALAK, A.V. BUDNIK

Abstract

By experimental research of bipolar transistors for functional parameter (gain factor of base current in the circuit with common emitter) the paper establishes the presence of linear correlation between the changes caused by the electrical mode parameters (collector current and collector-to-emitter voltage) as the imitation factors and changes resulting from long operating age of transistors. Close correlation (correlation factor module more than 0,7–0,8) is the evidence of the possibility to use electrical mode parameters as the imitation factors in forecasting gradual failures of bipolar transistors by imitation effect method.

Литература

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. Минск, 1998.
2. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белорус. инж. акад. 1998. № 2 (6)/2. С. 158–159.
3. Боровиков С.М., Ануфриев Л.П., Щерба А.И. // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Сб. материалов 2-й Междунар. науч.-техн. конф. Новополоцк, 2002. Т. 2. С. 66–69.
4. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 113–117.
5. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белорус. инж. акад. 2000. № 1 (9)/2. С. 110–111.
6. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Докл. БГУИР. 2005. Т. 3, № 3. С. 78–82.
7. Peattie D.S., Adams J.D., Carreli S.L. and oth. // Proc. IEEE. 1974. Vol. 62, № 2. P. 149–168.
8. Quick Logic Reliability Report / pASIC, Vialink and Quick Logic Corp. — Orleans, 1998.
9. Reliability Audit Report 1999. Life Test Data. ON Semiconductor L.L.C., Formerly a Division of Motorola, 1999.