

УДК 621.382.019.3

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.М. БОРОВИКОВ, А.И. ЩЕРБА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники**П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 9 января 2003*

Рассматривается метод прогнозирования параметрической надежности полупроводниковых приборов. Метод основан на использовании реакции функциональных параметров приборов на имитационное воздействие. Для биполярных транзисторов в качестве имитационного фактора предлагается использовать ток коллектора. Приводится пример прогнозирования работоспособности транзисторов.

*Ключевые слова:* полупроводниковые приборы, прогнозирование, параметрическая надежность, имитационные воздействия.

### Введение

Известно [1], что примерно 80% всех отказов полупроводниковых приборов приходится на постепенные (параметрические) отказы, поэтому прогнозирование параметрических отказов является актуальной задачей. Одним из методов решения этой задачи является использование имитационного моделирования. При таком моделировании полупроводниковый прибор кратковременно подвергают воздействию имитационного фактора, вызывающему такое же изменение функционального параметра прибора, как и его длительная наработка. Изменения параметров при воздействии имитационного фактора носят обратимый характер, что позволяет получать информацию о параметрической надежности, не повреждая прибор и при сохранении его рабочего ресурса.

В качестве имитационного фактора предложено использовать температуру [1]. Прогнозирование параметрической надежности полупроводникового прибора для заданной наработки сводится к измерению интересующего функционального параметра при имитационной температуре  $T_{им}$ , значение которой получают по уравнению связи, показывающему, как наработка  $t$  связана с температурой  $T_{им}$ . Считают, что  $T_{им}$  вызывает такое же изменение функционального параметра  $P$ , как и заданная наработка  $t$ . Результат измерения функционального параметра и будет его прогнозом для заданной наработки  $t$ . Сравнивая измеренное значение параметра  $P$  с нормой, делают заключение о параметрической надежности экземпляра. При реализации имитационного воздействия в этом случае приходится использовать кратковременное охлаждение или нагрев прибора до температуры  $T_{им}$  [1]. Длительность процедуры индивидуального прогнозирования может оказаться весьма заметной. Кроме того, на результаты прогнозирования может заметно повлиять погрешность поддержания имитационной температуры. Поэтому актуальным является также поиск других имитационных факторов, позволяющих уменьшить погрешности и сократить длительность самой процедуры индивидуального прогнозирования.

## Теоретический анализ

Авторами было предложено использовать в качестве имитационных факторов параметры электрических режимов работы полупроводниковых приборов (токи переходов или подаваемые на них напряжения).

Применительно к биполярным транзисторам интересным является выбор в качестве имитационного фактора такого электрического параметра, как ток коллектора [2]. Известно, что в процессе работы транзистора в определенном электрическом режиме его функциональные параметры изменяются. В то же время они заметно зависят и от тока коллектора. Между изменениями функциональных параметров, обусловленными временем работы, с одной стороны, и током коллектора, с другой, существует аналогия. Поэтому предоставляется возможность по значению функционального параметра  $P$  при определенном токе коллектора сделать вывод о параметрической надежности транзистора по этому параметру. При этом надо различать рабочий и имитационный токи коллектора. Для решения указанной задачи необходимо для параметра  $P$  иметь выражение (имитационную модель) вида

$$I_{K_{им}} = f(t), \quad (1)$$

где  $f$  — оптимальный оператор связи наработки  $t$  с имитационным током коллектора ( $I_{K_{им}}$ ).

Уравнение (1), называемое уравнением связи, позволяет по заданному значению наработки  $t$  определять имитационное значение тока  $I_{K_{им}}$ . Применительно к функциональному параметру  $P$  это уравнение можно получить, используя следующие выражения:

$$P = f_1(I_K), \quad (2)$$

$$P = f_2(t), \quad (3)$$

где  $f_1$  — символ математической зависимости интересующего функционального параметра  $P$  от тока коллектора  $I_K$ ;  $f_2$  — символ математической зависимости параметра  $P$  от наработки  $t$  при рабочем токе коллектора.

Процедура построения прогнозирующего правила в этом случае включает следующие этапы: получение для интересующего параметра  $P$  математических моделей видов (2) и (3), используя экспериментальные исследования интересующего типа транзистора; получение уравнения связи вида (1), используя модели (2) и (3); проверку пригодности уравнения (1) для оценки параметрической надежности транзисторов.

Когда уравнение (1) получено, то само индивидуальное прогнозирование в этом случае состоит в следующем. По заданной наработке  $t$  рассчитывают значение имитационного тока  $I_{K_{им}}$ , используя уравнение (1). Затем у  $j$ -го экземпляра измеряют параметр  $P$  при токе коллектора, равном значению  $I_{K_{им}}$ . Далее принимают решение об уровне параметрической надежности этого экземпляра для заданной наработки  $t$ : считают, что параметр  $P$   $j$ -го экземпляра по истечении наработки  $t$  будет иметь такое же значение, как полученное в результате измерения при токе коллектора, равном рассчитанному значению  $I_{K_{им}}$ .

## Экспериментальные исследования

Решалась задача индивидуального прогнозирования параметрической надежности биполярных транзисторов большой мощности типа КТ872А. В качестве параметра  $P$ , определяющего параметрическую надежность транзисторов, рассматривался коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером ( $h_{21Э}$ ) при рабочем токе коллектора, равном 0,1 А. В качестве имитационных факторов использовались абсолютная температура и ток коллектора. Ставилась задача — показать возможность прогнозирования параметрической надежности с помощью этих имитационных факторов и подтвердить более высокую эффективность тока коллектора как имитационного фактора.

Экспериментальные исследования представляли обучающий эксперимент и состояли в следующем. Случайным образом была сформирована выборка объемом 100 транзисторов ука-

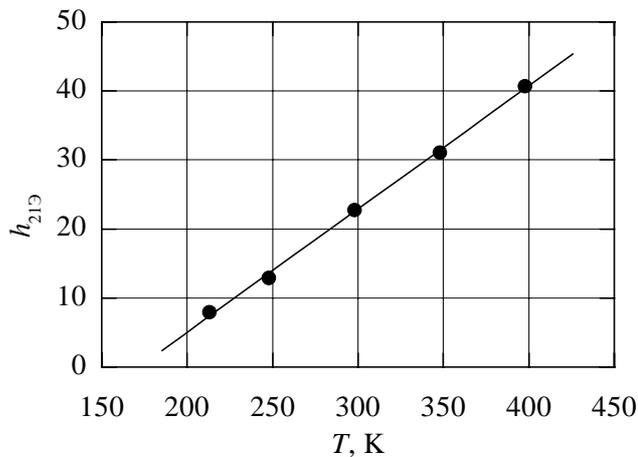


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента усиления  $h_{21Э}$  от абсолютной температуры  $T$  при  $U_{кБ}=5$  В и  $I_{к}=0,1$  А

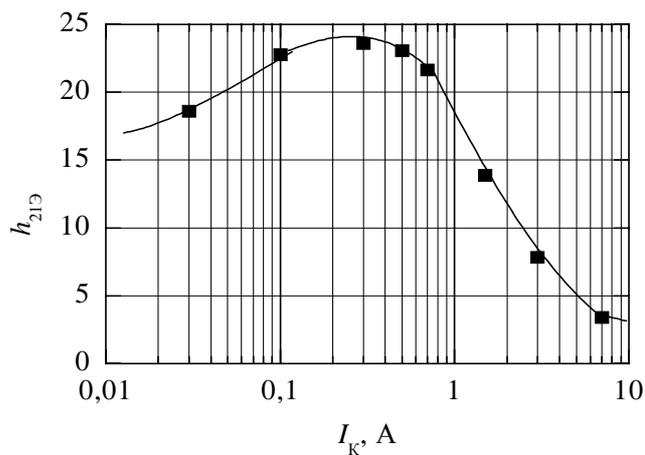


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента усиления  $h_{21Э}$  от тока коллектора  $I_{к}$  ( $U_{кБ}=5$  В,  $T=293\pm 5$  К)

занного типа. Ее называют обучающей выборкой. У каждого экземпляра этой выборки при комнатной температуре ( $293\pm 5$  К) был измерен коэффициент  $h_{21Э}$  при различных значениях тока коллектора в диапазоне 0,01–7 А. Затем у каждого экземпляра при рабочем токе коллектора, равном 0,1 А, были измерены значения  $h_{21Э}$ , соответствующие нескольким точкам абсолютной температуры в диапазоне 213–398 К. После этого обучающая выборка была испытана на долговечность при рабочем токе 0,1 А. Использовались ускоренные испытания, выполняемые по типовым методикам, коэффициент ускорения испытаний составлял примерно 80 [3]. В процессе испытаний в определенные моменты времени измерялись значения  $h_{21Э}$  у каждого экземпляра обучающей выборки. Графики экспериментальных зависимостей  $h_{21Э}$  от абсолютной температуры  $T$ , тока коллектора  $I_{к}$  и времени ускоренных испытаний  $t_y$ , полученные усреднением  $h_{21Э}$  по всем экземплярам обучающей выборки (100 шт.), показаны на рис. 1–3.

Для математического описания изменения  $h_{21Э}$  от абсолютной температуры  $T$  и тока коллектора  $I_{к}$  получены следующие модели:

$$h_{21Э} = 0,178 \cdot T - 30,6; \quad (4)$$

$$h_{21Э} = 1 / (0,022 \cdot I_{к} + 0,037). \quad (5)$$

Зависимость  $h_{21Э}$  от наработки  $t$ , соответствующая рабочему току коллектора  $I_{к}=0,1$  А:

$$h_{21Э} = 1 / (3,4 \cdot 10^{-7} \cdot t + 0,043). \quad (6)$$

Для температуры как имитационного фактора уравнение связи (имитационная модель), полученное с использованием моделей (4) и (6), приняло вид

$$T_{\text{эи}} = \frac{2,316 + 1,04 \cdot 10^{-5} \cdot t}{0,00765 + 6 \cdot 10^{-8} \cdot t}. \quad (7)$$

Для случая использования в качестве имитационного фактора тока коллектора уравнение связи, полученное с учетом моделей (5) и (6), соответствовало выражению

$$I_{\text{эи}} = 1,545 \cdot 10^{-5} \cdot t + 0,273. \quad (8)$$

### Результаты и их обсуждение

Индивидуальное прогнозирование параметра  $h_{21Э}$  и, следовательно, параметрической надежности транзисторов, не принимавших участие в обучающем эксперименте, можно выполнять, используя полученные имитационные модели (7) и (8).

При использовании температуры в качестве имитационного фактора поступают так. По модели (7) для заданной наработки  $t$  рассчитывают  $T_{\text{им}}$ . Например, для  $t=20\,000$  ч получим  $T_{\text{им}}=284,8$  К, а для  $t=1000$  ч —  $T_{\text{им}}=301,2$  К. Транзисторы, параметрическая надежность которых нас интересует, помещают в камеру тепла–холода. Далее обеспечивают значение температуры  $T_{\text{им}}$ , выдерживают транзисторы при этой температуре не менее 30 мин, а затем в условиях этой температуры у каждого экземпляра измеряют  $h_{21Э}$  при рабочем токе коллектора 0,1 А. Считают, что  $h_{21Э}$  у конкретного экземпляра по истечении наработки  $t$  будет иметь такое же значение, как измеренное при температуре  $T_{\text{им}}$ . Результат измерения будет прогнозом  $h_{21Э}$  для интересующей наработки  $t$ . Сравнивая измеренное значение  $h_{21Э}$  с нормой, делают заключение о параметрической надежности этого экземпляра по параметру  $h_{21Э}$ .

Применение полученной имитационной модели вида (7) для прогнозирования параметрической надежности транзисторов показало, что использование температуры как имитационного фактора имеет ряд недостатков. Так перепад имитационной температуры, соответствующий диапазону наработок от 0 до 20 000 ч, составляет около 17 К. При погрешности поддержания имитационной температуры, равной  $\pm 2$  К, ошибка в наработке, для которой получают прогнозное значение параметра  $h_{21Э}$ , может достигать 2 500 ч и даже более.

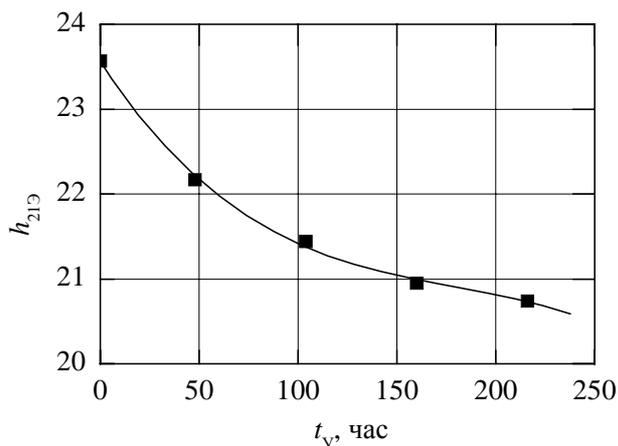


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента усиления  $h_{21Э}$  от времени ускоренных испытаний  $t_y$  ( $U_{\text{КБ}}=5$  В,  $I_{\text{К}}=0,1$  А)

При использовании тока коллектора в качестве имитационного фактора поступают следующим образом. По выражению (8) для заданной наработки  $t$  рассчитывают  $I_{\text{К.им}}$ . У экземпляра, параметрическая надежность которого нас интересует, измеряют  $h_{21Э}$  при токе коллектора, равном рассчитанному значению  $I_{\text{К.им}}$ . Считают, что у этого экземпляра  $h_{21Э}$  при рабочем токе коллектора по истечении наработки  $t$  будет иметь такое же значение, как измеренное при токе  $I_{\text{К.им}}$ . Результат измерения и будет прогнозом  $h_{21Э}$  для интересующей наработки  $t$ . Сравнивая измеренное значение

$h_{21Э}$  с нормой, делают заключение о параметрической надежности экземпляра. По выражению (8) можно определить, что для  $t=1000$  ч имитационный ток  $I_{К.им}=0,288$  А, а для  $t=20\ 000$  ч —  $I_{К.им}=0,582$  А. Это означает, что диапазону наработок 1000–20 000 ч при рабочем токе  $I_K=0,1$  А соответствует изменение имитационного тока коллектора около 300 мА. При погрешности поддержания  $I_{К.им}$ , не превышающей  $\pm 5$  мА, ошибка в наработке, для которой определяют прогнозное значение  $h_{21Э}$ , составит не более 300 ч в указанном диапазоне наработок. Кроме того, использование тока коллектора в качестве имитационного фактора существенно сократит длительность процедуры прогнозирования.

### Заключение

Выполненные исследования подтвердили научные гипотезы о возможности прогнозирования параметрической надежности полупроводниковых приборов по их реакции на имитационные воздействия. Установлено, что использование температуры как имитационного фактора имеет недостатки, обусловленные необходимостью нагрева или охлаждения полупроводникового прибора и заметными ошибками прогнозирования функциональных параметров. Показано, что использование для биполярных транзисторов тока коллектора в качестве имитационного фактора позволяет во многом устранить указанные недостатки. Это было подтверждено не только на примере коэффициента  $h_{21Э}$ , но и на примерах других важнейших функциональных параметров транзисторов исследуемого типа [4]. Так, при прогнозировании параметрической надежности по такому функциональному параметру как напряжение насыщения коллектор-эмиттер ( $U_{КЭнас}$ ), диапазону наработок 1 000–20 000 ч соответствовало изменение имитационного тока коллектора, равное 800 мА. При погрешности поддержания  $I_{К.им}$ , не превышающей даже  $\pm 10$  мА, ошибка в наработке, для которой определяют прогнозное значение параметра  $U_{КЭнас}$ , составляла не более 300 ч (в области наработок, близких к максимальной, указываемой в технической документации).

## SEMICONDUCTOR DEVICE UP STATE PREDICTION WITH SIMULATION EFFECT TECHNIQUE

S.M. BARAVIKOU, A.I. SHCHERBA

### Abstract

The discussed technique is used to predict semiconductor device up state according to gradual failure. The technique is based on taking into account the reaction of semiconductor device functional parameters to simulation effect. Collector current is offered to be used as a simulation factor for bipolar transistors. There is an example of prediction transistor up state according to gradual failure.

### Литература

1. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Изв. Белорус. инж. акад. 1998. № 2 (6)/2. С. 158–159.
2. Боровиков С.М., Щерба А.И. // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Сб. материалов Междунар. науч.-техн. семинара. 29–30 мая 2000 г. Новополоцк, 2000. С. 265–267.
3. Боровиков С.М., Щерба А.И., Стасюк Д.М., Зорин Д.В. // Изв. Белорус. инж. акад. 1999. № 1 (7)/2. С. 80–82.
4. Боровиков С.М. // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. № 2 (14)/2. С. 181–182.