

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ НАРАБОТОК

Жук Е.В.

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

Научный руководитель: Боровиков С.М. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. На примере транзисторов КТ872А показана возможность прогнозирования функционального параметра биполярных транзисторов на длительных наработках с помощью электрических имитационных воздействий (тока коллектора или обратного напряжения). Метод заключается в измерении параметра транзисторов при токе или напряжении, имитирующих заданную наработку и определяемых по заранее полученной функции связи. Использование электрических воздействий сокращает время прогнозирования по сравнению с температурным воздействием, а также исключает необходимость использования сложного и дорогостоящего оборудования для поддержания имитационной температуры. Предложенный подход упрощает и ускоряет процесс прогнозирования функциональных параметров транзисторов для заданных наработок.

Ключевые слова: биполярный транзистор, параметрическая надёжность, прогнозирование, имитационные воздействия, ток коллектора, обратное напряжение, ускоренное старение, коэффициент усиления, электрические параметры.

Введение. Прогнозирование параметрической надёжности полупроводниковых приборов во многом способствует обеспечению требований к надёжности электронных устройств. Решение задач прогнозирования надёжности актуально для биполярных транзисторов большой мощности, которые широко применяются в таких критически важных отраслях, как телекоммуникации, автомобильная электроника, медицинская аппаратура и авиационные комплексы. Параметрическая надёжность транзисторов определяет их способность сохранять работоспособность и стабильность электрических характеристик в условиях длительной эксплуатации и наличия воздействий окружающей среды.

Традиционные подходы к оценке параметрической надёжности, такие как ускоренные испытания (*Accelerated Life Testing, ALT*), предполагающие применение высоких температур, повышенных напряжений и радиационных нагрузок, имеют ряд существенных недостатков. Среди основных проблем можно выделить значительные временные затраты на проведение испытаний, высокую стоимость и необходимость использования сложного и дорогостоящего специализированного оборудования для поддержания заданных условий испытаний.

В данной работе предлагается альтернативный подход, направленный на преодоление указанных ограничений и повышение эффективности процесса прогнозирования параметрической надёжности. Основная идея нового метода заключается в применении кратковременных электрических имитационных воздействий, таких как изменение тока коллектора или обратного напряжения на коллекторе транзистора, позволяющих моделировать эксплуатационные изменения его электрических параметров. Данный подход значительно сокращает время, необходимое для оценки параметрической долговечности транзисторов, и предлагает более доступное решение по сравнению с традиционными методами.

Важным преимуществом предлагаемой методики является отказ от использования термических и радиационных воздействий, что позволяет упростить процедуру тестирования, снизить затраты и сделать метод пригодным для широкого внедрения в

условиях массового производства. Таким образом, методика не только ускоряет процесс прогнозирования, но и повышает эффективность процедуры отбора компонентов с высоким уровнем параметрической надежности.

Основная часть. Прогнозирование параметрической надежности биполярных транзисторов требует глубокого понимания взаимосвязей между электрическими характеристиками, такими как коэффициент усиления, и воздействиями внешней среды, которые могут оказывать влияние на эти параметры в процессе эксплуатации устройства. Эти внешние воздействия, включая изменения температуры, напряжения и токов, могут существенно повлиять на долговечность и стабильность работы транзисторов, особенно в критически важных системах. В отличие от традиционных методов ускоренного старения, использующих высокие температуры или радиационные воздействия для моделирования долговечной работы компонентов, предложенная методика ориентирована на использование электрических воздействий, таких как ток коллектора или обратное напряжение. Эти воздействия могут точно имитировать изменения в характеристиках транзистора, которые наблюдаются при длительном процессе его эксплуатации, и позволяют более точно прогнозировать его поведение в будущем.

Теоретическая основа предложенного метода заключается в установлении эмпирических зависимостей между параметрами биполярных транзисторов, которые изменяются под воздействием электрического тока или напряжения, и долговечностью этих компонентов в процессе эксплуатации. Ключевым моментом является то, что воздействие на транзистор током коллектора или обратным напряжением должно быть достаточно интенсивным, чтобы вызвать те же изменения, которые обычно наблюдаются в процессе долгосрочной эксплуатации устройства, но в то же время оно не должно приводить к необратимым повреждениям или разрушению структуры транзистора. Электрические функциональные параметры транзисторов заметно реагируют на изменения тока коллектора или обратного напряжения, прикладываемого к коллекторному переходу, при этом эти изменения являются обратимыми и не сопровождаются деградацией характеристик устройства. Выполненные ранее исследования [1] подтвердили статистическую аналогию между обратимыми изменениями электрических параметров, обусловленных изменением тока коллектора, и необратимыми изменениями (деградацией), вызванными наработкой транзисторов. Это позволяет по значению электрического функционального параметра, измеренному при определённом токе коллектора, делать прогнозы относительно его изменений при дальнейшем увеличении наработки.

Такой подход позволяет в короткие сроки собрать информацию о потенциальной деградации электрических характеристик транзистора, что значительно ускоряет процесс прогнозирования и позволяет снизить затраты на проведение длительных и дорогостоящих испытаний.

В отличие от традиционных методов ускоренного старения (ALT), которые требуют применения сложного и дорогостоящего оборудования для создания высокотемпературных или радиационных условий, предложенная методика может быть эффективно реализована с использованием стандартных лабораторных приборов, таких как амперметры, вольтметры и осциллографы. Это делает метод доступным для широкого круга приложений и позволяет интегрировать его в существующие производственные линии для контроля качества компонентов на всех этапах производства. Такой подход не только снижает затраты на испытания, но и повышает общую эффективность производственного процесса, предоставляя возможность для более быстрого и точного тестирования компонентов, что особенно важно для массового производства.

Для проверки эффективности предложенного подхода были проведены эксперименты на биполярных транзисторах типа КТ872А, результаты которых подтвердили высокую точность и надежность метода, а также его способность дать точное предсказание долговечности компонентов в условиях реальной эксплуатации. Это подтверждает практическую ценность метода в промышленном применении и его перспективы для разработки более надежных и долговечных полупроводниковых устройств. В ходе этих

экспериментов использовалась модель, связывающая наработку устройства с имитационными электрическими воздействиями. Результаты показали, что кратковременное воздействие током коллектора с заданным уровнем является достаточно точным индикатором будущей деградации параметров транзистора.

Для наглядности результатов и более полной характеристики поведения транзистора зависимость коэффициента усиления ($h_{21Э}$) исследовалась при постоянном напряжении коллектор-эмиттер в широком диапазоне токов коллектора (рисунок 1):

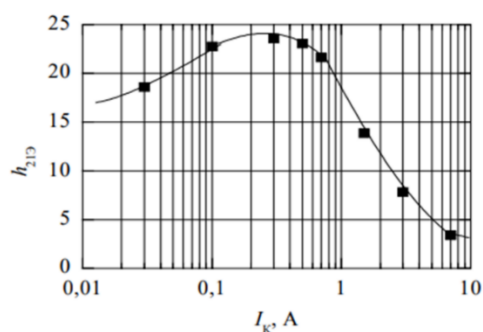


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость коэффициента усиления $h_{21Э}$ от тока коллектора I_k для биполярных транзисторов большой мощности КТ872А ($U_{КБ} = 5\text{ В}$, $T = 293 \pm 5\text{ К}$)

Данная графическая зависимость подтверждает, как изменение тока коллектора может влиять на параметр транзистора. Эти данные являются основой для применения метода электрических имитационных воздействий.

Для обеспечения более полной картины изменения параметра транзисторов в процессе эксплуатации была получена экспериментально зависимость коэффициента усиления ($h_{21Э}$) от времени ускоренных испытаний (t_y) (рисунок 2).

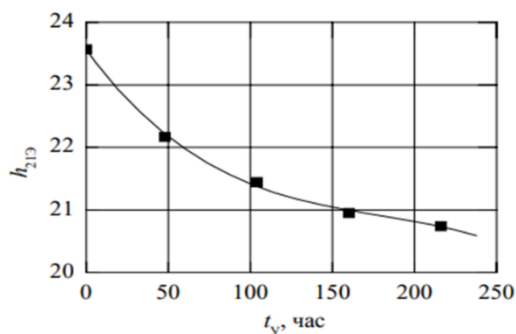


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость коэффициента усиления $h_{21Э}$ от времени ускоренных испытаний t_y для биполярных транзисторов большой мощности КТ872А ($U_{КБ} = 5\text{ В}$, $I_k = 0,1\text{ А}$)

Эта зависимость подтверждает связь между продолжительностью работы транзистора и изменениями его функционального параметра, что позволяет использовать имитационное воздействие для предсказания значений функционального параметра для заданной наработки. Полученные данные служат основой для разработки модели, применимой к прогнозированию параметрической надёжности других типов транзисторов и полупроводниковых устройств [2].

Основными достоинствами предложенного метода являются высокая эффективность, точность предсказаний и легкость в реализации. В отличие от традиционных методов, которые требуют длительных ускоренных испытаний с использованием высоких температур или радиационных воздействий, данный подход позволяет получать результаты за значительно меньшее время. Это не только ускоряет процесс прогнозирования, но и значительно снижает расходы на проведение испытаний и закупку дорогостоящего оборудования.

Кроме того, метод с использованием электрических имитационных воздействий исключает необходимость применения сложных и затратных устройств для создания условий ускоренного старения. Ток коллектора или обратное напряжение, выступающие в качестве имитационных воздействий, легко регулируются и измеряются с помощью стандартных лабораторных инструментов, что делает метод доступным и эффективным для промышленного применения. Еще одним значительным преимуществом является гибкость метода. Поскольку он не зависит от конкретных условий для каждого типа полупроводникового устройства, его можно адаптировать для различных типов транзисторов и других полупроводниковых компонентов. Для каждого устройства можно разработать индивидуальную имитационную модель, что делает этот метод универсальным и подходящим для применения в разнообразных отраслях, таких как энергетика, телекоммуникации и автомобильная электроника.

Заключение. Разработанный метод оценки параметрической надежности биполярных транзисторов, основанный на использовании электрических имитационных воздействий, демонстрирует высокую эффективность, оперативность и экономичность при прогнозировании долговечности полупроводниковых устройств. Его применение существенно сокращает продолжительность испытаний, минимизирует потребность в специализированном и дорогостоящем оборудовании, а также уменьшает общие затраты на проведение исследований при сохранении высокой точности результатов. Благодаря возможности адаптации к различным типам полупроводниковых компонентов предложенный метод обладает широким потенциалом для применения в многочисленных промышленных направлениях.

В перспективе дальнейшее совершенствование данного подхода позволит еще больше повысить точность и оперативность прогнозирования надежности полупроводниковых приборов, а также обеспечит дополнительный рост производительности и эффективности технологических процессов на производстве.

Список литературы

1. Боровиков, С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники. / С.М. Боровиков. – М.: Издательство «Новое знание», 2013. – 343 с.
2. Экспериментальное исследование деградации изделий электронной техники / С.М. Боровиков, Е.Н. Шнейдеров, В.И. Плебанович [и др.] // Доклады БГУИР. – 2017. – 2(104). – 45–52.

UDC 621.382.33-0.27.45

FORECASTING ELECTRICAL FUNCTIONAL PARAMETERS OF BIPOLAR TRANSISTORS FOR LONG-TERM OPERATING TIME

Zhuk Y.V.

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

Borovikov S.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The example of KT872A transistors demonstrates the possibility of predicting the functional parameter of bipolar transistors for long-term operation times using electrical simulation effects (collector current or reverse voltage). The method consists of measuring the transistor parameter at a current or voltage simulating a given operation time and determined by a previously obtained of coupling function. The use of electrical effects reduces the prediction time compared to temperature effects, and also eliminates the need to use complex and expensive equipment to maintain the simulation temperature. The proposed approach simplifies and accelerates the process of predicting the functional parameters of transistors for given operation times.

Keywords: bipolar transistor, parametric reliability, prediction, simulation stress, collector current, reverse voltage, accelerated aging, gain coefficient, electrical parameters, durability.