

УДК 621.382.33

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук,**И.Ю. Капранов***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***СТЕНД НЕРАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЙ ТРАНЗИСТОРОВ**

Проведен анализ причин перераспределения тока в транзисторной структуре. Разработан макет для проведения неразрушающих испытаний биполярных транзисторов. Представлены результаты контроля партии транзисторов.

Ключевые слова: надежность, вторичный пробой, биполярный транзистор, неразрушающий тест.

Надежность функционирования транзисторов вблизи границ области безопасной работы (ОБР) определяется их устойчивостью к самопроизвольной локализации мощности внутри структуры. Кратковременная работа в таком режиме наблюдается при переходных процессах во время включения и выключения аппаратуры, при быстром изменении характера нагрузки, а также при работе на рассогласованную нагрузку.

Перераспределение тока в транзисторной структуре может быть вызвано как регулярными факторами, так и случайными. К регулярным факторам относят отеснение тока к периферии эмиттерного перехода вследствие падения напряжения на сопротивлении тела базы и неравномерную инжекцию эмиттерного перехода, связанную с падением напряжения на сопротивлении металлизированных полосок эмиттера и базы. К случайным факторам относятся: неоднородность диффузионных слоев и переходного сопротивления в области омических контактов эмиттера и базы; локальные колебания в величине теплового сопротивления коллектора, которые могут возникнуть из-за некачественной напайки кристалла или из-за различной толщины отдельных кристаллов, объединенных параллельно в одном корпусе; дефекты в области p - n переходов (дислокации, скопление примесей) и в геометрии структуры (инородные включения на поверхности кристалла); неоднородность удельного сопротивления и толщины полупроводниковых слоев [1]. Именно случайные факторы в основном определяют разброс индивидуальных ОБР по отношению к среднестатистической для транзисторов. Развитие образовавшихся "горячих пятен" при недостаточном ограничении энергии импульсов заканчивается, как правило, растрескиванием и проплавлением кристалла. Отказ транзистора сопровождается необратимым скачкообразным увеличением проводимости в цепи коллектор–эмиттер (вторичный пробой, ВП). Отсутствие ВП транзистора при работе в режиме "горячих пятен" в течение некоторого времени не гарантирует от наступления его в дальнейшем. Периодическое появление перегретой области сопровождается значительными термомеханическими напряжениями, которые способны приводить к накоплению структурных дефектов. Кроме того, зависимость скорости нарастания токомпературных флуктуаций от индивидуальных свойств транзисторов и режимов эксплуатации делает проблематичным использование динамической ОБР, рекомендуемой изготовителем на основе статистических испытаний.

В известных методах экспериментального определения индивидуальной ОБР в качестве информативных параметров, свидетельствующих о наступившей локализации мощности, используются прямое напряжение на эмиттере, токи базы и коллектора или их производные по времени [2,3]. Области применения этих методов ограничивают такие их особенности, как необходимость использования импульсов мощности определенной формы, а также недостаточная чувствительность при обнаружении перегретых областей малой площади на больших уровнях инжекции. Проведенные исследования [4] показали, что в качестве параметра – критерия неразрушающего контроля транзисторов следует использовать ток индуцированного канала $I_{кан}$, протекающего в локальной области структуры.

Целью данной работы является исследование процессов токошнурования в структуре приборов и разработка на этой основе стенда неразрушающих испытаний мощных транзисторов.

Вторичный пробой, обусловленный токошнурованием в структуре – явление фундаментальное, присущее всем конструкторско-технологическим типам транзисторов, т.е. всегда можно найти такой режим, при котором даже в идеальном транзисторе произойдет локализация мощности вплоть до отказа. Наличие в реальной структуре различных дефектов приводит к уменьшению энергии ВП. Следовательно, величина энергии, необходимая для появления "горячих пятен", может служить относительной мерой дефектности конкретной структуры, измерение индивидуальной энергии, необходимой для развития локализации на фиксированном уровне, позволяет отобрать наиболее дефектные, т.е. наименее надежные транзисторы.

Время нарастания токотемпературных флуктуаций сильно зависит от выбранных режимов по току и напряжению. На больших уровнях инжекции (область **A** на рисунке 1) инициирующим фактором для локализации служит регулярная неоднородность токораспределения, вызванная оттеснением тока к периферии эмиттера. Следовательно, измерение ОБР в этой области позволяет выявить структурные дефекты в периферийной части эмиттерного и коллекторного переходов; индивидуальное действие этих дефектов замаскировано регулярным фактором. Измерение ОБР в области **B** позволяет выделить, в основном, глубокие активные дефекты в ОПЗ коллектора, которые приводят к локальному увеличению коэффициента лавинного умножения. В этой области режимов время нарастания токотемпературных флуктуаций может быть менее микросекунды, поэтому обеспечить бездеградационность испытаний крайне сложно. В области **C** токовые и потенциальные регулярные факторы играют меньшую роль и поэтому хорошо проявляются индивидуальные неоднородности всех активных областей транзисторной структуры.

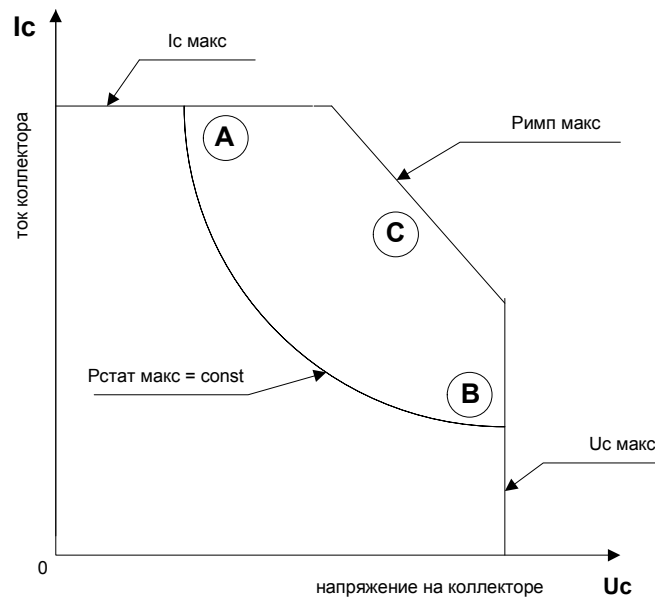


Рисунок 1 — Область безопасной работы биполярного транзистора

Использование пикового значения тока канала в качестве информационного параметра, свидетельствующего о наступлении локализации мощности, при измерении динамической ОБР позволяет обнаруживать значительно более ранние стадии локализации мощности, чем при использовании параметра dI_b/dt , и тем самым исключить катастрофические отказы испытуемых транзисторов.

Необходимо отметить, что наличие тока канала даже в несколько миллиампер является результатом разогрева области локализации до уровня порядка температуры собственной проводимости (250°C), следовательно, сопровождается циклическими термомеханическими напряжениями. Поэтому в высоконадежной аппаратуре должны быть исключены режимы, приводящие к образованию канала проводимости в транзисторах. Выбор конкретного уровня тока канала для оценки возможности использования транзистора в реальной схеме должен производиться с учетом требований к надежности, весогабаритным показателям и стоимости аппаратуры. Возможности проведенных исследований могут быть расширены, если проводить испытания в режиме импульса, который будет характеризовать реальный профиль мощности транзистора, т.е. те режимы, в которых данные транзисторы будут работать. Время остывания «горячего пятна» реальных транзисторов составляет десятки микросекунд. Это дает возможность обнаружить появление области перегрева путем периодического прерывания импульса мощности на время (3...5) мкс в цепи эмиттера или базы. В последнем случае базу необходимо заземлять на время паузы для уменьшения влияния тока термогенерации и коэффициента усиления транзистора. За столь короткое время температурный профиль транзистора не успевает существенно измениться, поэтому кинетика нарастания токотемпературной флуктуации при включении последующего импульса мощности изменяется также незначительно. В паузе через время задержки включения транзистора (1...2) мкс измеряют текущее значение тока канала. Разогрев транзистора прекращают, когда пиковое значение тока $I_{кан}$ достигает установленной величины, и по общей длительности импульса при известных остальных режимах и скважности делают заключение о целесообразности использования данного транзистора. Слабая зависимость $I_{кан}$ от напряжения на

коллекторе в паузе импульса тока позволяет производить измерения при произвольной форме тока коллектора и напряжения на нем, т.е. приблизить режимы испытаний к реальным условиям.

При выборе длительности каждого из импульсов в серии, составляющей импульс мощности, необходимо учитывать следующее. Во-первых, длительность импульса должна быть больше паузы для уменьшения изменения кинетики нарастания «горячего пятна». Во-вторых, длительность импульса должна быть меньше возможного времени разогрева, за которым последует отказ в процессе нагрева или при выключении. Как показали измерения в режиме одиночных импульсов с нарастающей длительностью, интервал времени, за которое $I_{кан}$ увеличивается на порядок составляет примерно 30 % от общего времени катастрофического разогрева и уменьшается при увеличении напряжения на коллекторе. В-третьих, необходимо учитывать возможность инициализации электрической формы ВП во время включения и выключения транзистора, особенно при больших напряжениях на коллекторе. Последний фактор может сыграть положительную роль при проверке транзисторов, работающих на реактивную нагрузку на высокой частоте.

Описанный выше метод индивидуальной прогнозируемая ОБР был положен в основу разработанного макета. Макет позволяет проводить неразрушающий контроль в двух режимах. Первый режим осуществляется увеличением амплитуды греющего импульса тока при постоянной длительности импульса. Критическим значением устойчивости транзистора в этом случае является максимальное значение тока в эмиттере, при котором индуцируется каналный ток амплитудой 10 мА. Второй режим основан на увеличении мощности греющего импульса за счет увеличения длительности импульса. Критерием в этом случае является максимальное значение мощности (длительности) греющего импульса, при котором достигается значение тока канала 10 мА.

Блок-схема устройства макета изображена на рисунке 2. В эмиттер испытуемого транзистора (ИТ), включенного в схеме с общей базой, задается импульс тока от генератора импульсов тока эмиттера в соответствии с тактовой диаграммой Т1 (рисунок 3,а и 3,б). Напряжение на коллекторе ИТ поддерживается источником коллекторного напряжения, на выходе которого включены батарея конденсаторов емкостью 2500 мкФ. При поступлении импульса сброса, схема контроля эмиттера и схема контроля коллектора переходят в состояние «исправно», а счетчик импульсов устанавливается в ноль, запускается генератор тактовых импульсов, который генерирует тактовые импульсы Т1, Т2, Т3. Импульсы Т1 преобразуются генератором импульсов тока в импульс тока установленной величины. Такт Т2 служит стробом для регистрации схемами контроля эмиттера и коллектора выходных сигналов от компараторов цепи эмиттера и тока коллектора при $U_{эмп} > 3$ В и $I_k = 0$ соответственно. Если выполняется любое из этих условий, то генератор тактовых импульсов запирается. Если оба условия не соблюдаются, то генератор импульсов тока эмиттера продолжает генерировать импульсы тока до тех пор, пока в паузе по такту Т3 не будет обнаружен ток $I_{кан} \geq 10$ мА. Измерение производится компаратором цепи коллектора тока канала, текущий по цепи источник коллекторного напряжения — коллектор ИТ — эмиттер ИТ — компаратор цепи эмиттера — схема контроля эмиттера — схемная «земля». Если условие $I_{кан} \geq 10$ мА не регистрируется, то работа схемы останавливается по сигналу переполнения счетчика.

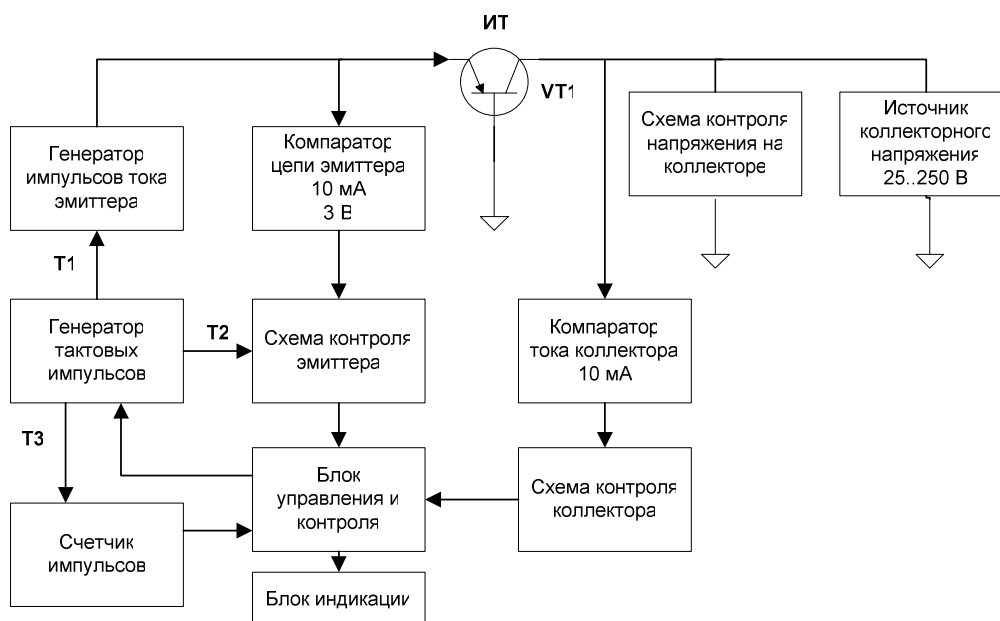


Рисунок 2 — Блок-схема макета

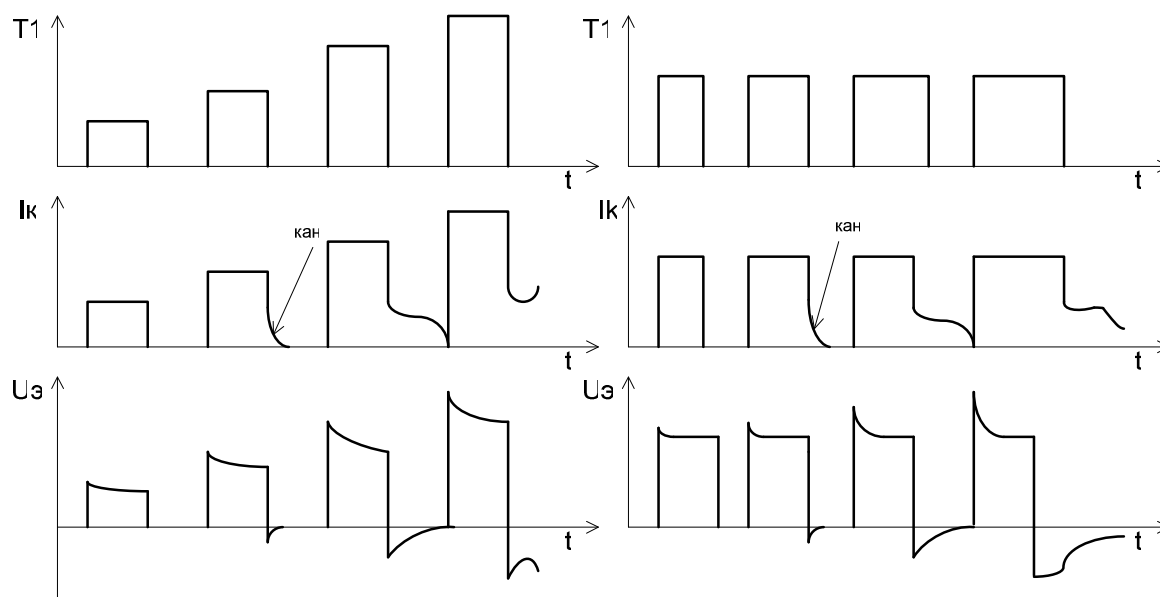


Рисунок 3 – Диаграммы режимов работы макета: а) при испытаниях с нарастающей амплитудой, б) при испытаниях с нарастающей длительностью импульса

В разработанной установке реализовано $U_{\text{МАКС}} = 250$ В. Максимальная длительность импульса в установке выбрана равной 2 мс. Это позволяет, с одной стороны, уменьшить перегрузки по току и напряжению, и, с другой стороны, испытывать транзисторы без внешнего теплоотвода (радиатора). Для установления конкретных значений параметров испытаний необходимы статистические испытания транзисторов в объеме (50...100) штук конкретного типа и завода-изготовителя. Для получения режимов статистических испытаний необходимо методом последовательных переборов токовых и потенциальных режимов добиться того, чтобы (95...98) % от объема выборки объемом (50...100) штук попадало в диапазон (0...2) мс.

Мерой устойчивости транзистора к локализации является количество импульсов от генератора тактовых импульсов при заданном токе эмиттера и напряжении на коллекторе. Этот режим работы ("Классификатор") используется для статистических испытаний партии транзисторов данного типа с целью установления минимально допустимого уровня энергии (количества импульсов). Во втором режиме ("Разбраковка") блок управления останавливает испытания при достижении установленного количества импульсов, если к моменту окончания последнего ток канала не достиг 10 мА. В этом случае транзистор считается годным. Если ток $I_{\text{кан}}$ достиг уровня при меньшем числе импульсов, чем было установлено, то измерения также прекращаются. В этом случае транзистор считается не годным.

Распределение, полученное на основе статистических испытаний, служит основой для установления нижней доверительной границы ("класс годности") при заданном проценте отбраковки при осуществлении входного контроля.

Для подтверждения приведенных теоретических исследований, используя разработанный макет, были проведены экспериментальные исследования устойчивости к локализации тока транзисторов КТ838А и КТ940А.

Для того, чтобы испытания наиболее достоверно отражали поведение транзисторов необходимо задавать режимы, превышающие реальные не более чем в 1,5...2 раза. Исходя из этого, испытания проводились в активном режиме в схеме с общей базой при $U_{\text{КБ}} = 150$ В. В базу задавались ступенчато возрастающие импульсы тока. По окончании каждого импульса база закорачивалась на общую шину; а в цепи эмиттера измерялся сквозной ток коллектор–эмиттер. Ток эмиттера очередного импульса, после которого сквозной ток достигал 10 мА, считался критическим для данного транзистора. Длительность импульсов, равная 0,2 мс и скважность 10 выбрана с таким расчетом, чтобы среднее значение критического тока в транзисторах испытываемой партии было около 8 А.

Испытаниям была подвергнута партия транзисторов КТ838А в количестве 80 штук. Гистограмма распределения транзисторов в партии по критическому току показана на рисунке 4,а. Из гистограммы следует, что 85 % транзисторов попадают в режим значительной локализации мощности при токе более 5 А. Транзистор считается прошедшим отбраковку, если значение критического тока эмиттера больше выбранного значения 5 А.

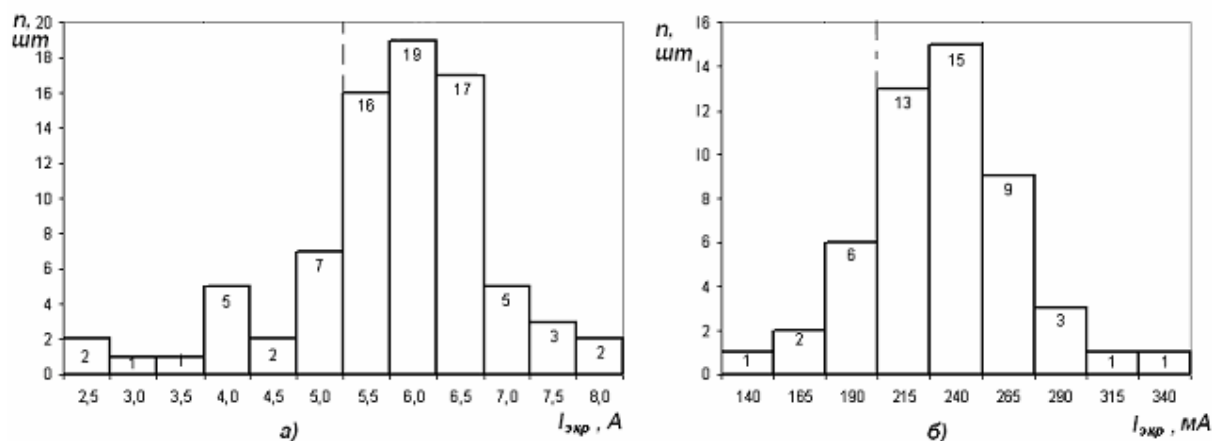


Рисунок 4 – Гистограмма распределения партии транзисторов по критическому току эмиттера при $I_{кан} = 10$ мА: а) для КТ838А; б) для КТ940А

По аналогичной методике были проведены испытания транзисторов КТ940А. Режимы испытания следующие: $U_{КБ} = 200$ В, $t = 0,2$ мс, $Q = 10$.

На рисунке 4б показана гистограмма распределения транзисторов по току эмиттера. Внутри столбцов размещено количество транзисторов с соответствующим критическим током. Анализ рабочих режимов транзисторов этого типа в схемах позволяет предположить о недостаточной надежности транзисторов с критическим током эмиттера менее 200 мА.

Проведенные экспериментальные исследования показали значительные различия транзисторов внутри партии по динамической устойчивости, о чем упоминалось выше и возможность применения оценки устойчивости к локализации тока для входного контроля мощных транзисторов и выявления потенциально ненадежных.

Таким образом, для уменьшения влияния различий в регулярных факторах локализации тока целесообразно проводить измерения при одинаковых для транзисторов данного типа токе эмиттера и напряжении на коллекторе. В этом случае оценку индивидуальной устойчивости к локализации можно производить по длительности или амплитуде импульса, которая необходима для появления "горячего пятна" на одинаковом для всех транзисторов данного типа уровне развития. Как уже отмечалось ранее, мерой развития локализации может служить величина тока канала, выбранная в данной установке на уровне 10 мА. Для исключения деградации и катастрофического отказа слабых структур внутри импульса мощности необходимо использовать тот импульс мощности, который соответствует профилю мощности в реальном режиме применения транзистора, а измерение тока канала осуществлять в паузах. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований изготовлен макет устройства для измерения индивидуальной ОБР и отбраковки потенциально ненадежных транзисторов с параметрами $I_{к, макс} = 10$ А, $U_{к, макс} = 250$ В, $T_{и, макс} = 2$ мс, $I_{кан} = 10$ мА.

В дальнейших исследованиях целесообразно рассмотреть перспективу использования разработанного устройства для отбраковки потенциально ненадежных мощных приборов IGBT, нашедших широкое применение в энергетической электронике.

Бibliографический список

1. Xiaohu Zhang. Failure mechanism investigation for silicon carbide power devices / Zhang Xiaohu // Device and Materials Reliability. — 2006. — Iss. 4. — P. 577–588.
2. Рабодзей А.Н. Исследование динамики локализации тока в мощных транзисторах / А.Н. Рабодзей // Электронная техника. Сер.2. ПП приборы. — 1981. — Вып. 2. — С. 24–28.
3. Liu W. Failure mechanisms in AlGaAs/GaAs power heterojunction bipolar transistors / W. Liu // Electron Devices. — 1996. — Iss. 2. — P. 220–227.
4. Гусев В.А. Неразрушающий метод контроля образования «горячих» областей в структуре транзистора / В.А. Гусев, И.Ю. Капранов // Вестник СевГТУ. Сер. Информатика, электроника, связь: сб. науч. тр. — Севастополь, 2008. — Вып. 93. — С. 106–109.

Поступила в редакцию 13.04.2009 г.