

УДК 621.382.33

В.А. Гусев, профессор, д-р техн. наук,

И.Ю. Капранов, ассистент

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ «ГОРЯЧИХ» ОБЛАСТЕЙ В СТРУКТУРЕ ТРАНЗИСТОРА

Проведен анализ критериев вторичного пробоя биполярных транзисторов с полосковой топологией эмиттера. Представлены результаты экспериментальных исследований с обоснованием метода проведения неразрушающих испытаний.

Один из главных механизмов внезапных отказов мощных транзисторов связан с неустойчивостью однородного токораспределения по структуре. При некоторых значениях тока и напряжения происходит внезапное снижение напряжения на приборе, которое сопровождается возникновением неоднородности распределения тока, что приводит к сильному разогреву локальной области транзисторной структуры и, как правило, вызывает отказ транзистора. Это явление исторически называется «вторичным пробоем» (ВП).

Область безопасной работы (ОБР) определяет предельно-допустимые параметры транзистора: максимальный ток коллектора I_{Cmax} , напряжение U_{CE} , максимальную мощность рассеяния P_{max} , максимальную температуру перехода T_{jmax} в стационарных и импульсных режимах работы. В известных методах [1 — 3] экспериментальное определение области безопасной работы (ОБР) в качестве информативных параметров, свидетельствующих о наступлении локализации мощности, используются прямое напряжение на эмиттере, токи базы и коллектора или их производные по времени. 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.

Объектом данного исследования являются процессы локализации тока в биполярном транзисторе в импульсных режимах. Цель исследования — провести анализ критериев развития вторичного пробоя, и на основании экспериментальных данных сформулировать требования к неразрушающему методу определения ОБР биполярного транзистора.

Механизм возникновения и развития ВП зависит от режима работы и конструктивных особенностей транзистора. Согласно проанализированным данным [4], основным механизмом ВП при прямом смещении эмиттера является тепловой, а при обратном — лавинная инжекция. Вторичный пробой в транзисторах с прямосмещенным эмиттерным переходом вызывается эффектами аккумуляции тока, связанными с поперечной тепловой неустойчивостью и наличием токотемпературных связей.

Решая уравнение, отражающее токораспределение в транзисторе с полосковой топологией эмиттера при различных уровнях инжекции, можно получить выражение для минимального тока ВП, при котором время задержки ВП стремится к бесконечности $\tau \rightarrow \infty$,

$$I_0 = \left(\frac{2}{b_\mu} \right)^{1/2} h_e \left[q D_B N_B W_B \frac{T_C - T_0}{W_{KP} \cdot U_C} \frac{B(\bar{z})}{R(\bar{z})} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где b_μ — отношение подвижности электронов к подвижности дырок; h_e — длина или периметр эмиттера; q — заряд электрона; D_B — коэффициент диффузии неосновных носителей в базе; N_B — концентрация основных носителей заряда базы; W_B — толщина базовой области; T_C — собственная температура; T_0 — температура окружающей среды; W_{KP} — толщина кристалла; U_C — напряжение коллектора; $B(\bar{z})$ — коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером в зависимости от уровня инжекции; $R(\bar{z})$ — коэффициент изменения сопротивления базового слоя в зависимости от уровня инжекции; $\bar{z}$ — уровень инжекции.

Анализ выражения (1) показывает, что устойчивость транзистора к ВП возрастает с увеличением отношения периметра эмиттера к его площади, уменьшением толщины кристалла, увеличением N_B и коэффициента передачи тока, уменьшением температуры теплоотвода.

Экспериментальное определение границы ВП является наиболее сложной задачей при построении ОБР транзисторов. Критерии определения ОБР можно разделить на 2 группы:

- критерии, основанные на деформации входных вольтамперных характеристик (ВАХ) испытуемого транзистора (ИТ);
- критерии, основанные на определении момента образования «горячих пятен» в структуре ИТ.

Проведенные исследования поведения различных типов транзисторов в импульсных режимах показали, что при наличии «горячего пятна» в момент окончания воздействующего импульса тока появляется канал проводимости в цепи коллектор — эмиттер, изолированный от базы. Пиковое значение тока проводимости монотонно возрастает при увеличении греющих импульсов и может достигать 30 % от воздействующего тока коллектора. Время спада тока канала после окончания разогрева составляет 30...100 мкс, но при приближении к режиму отказа резко увеличивается до 500 мкс и более.

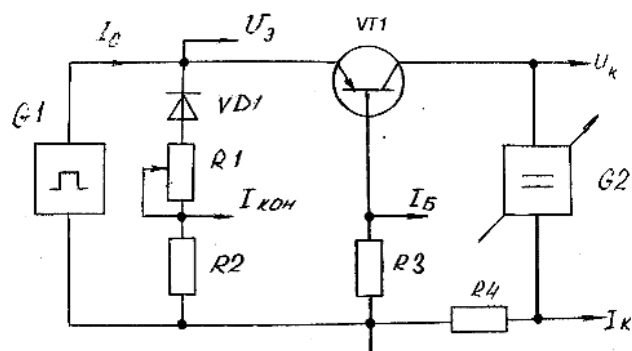


Рисунок 1 — Функциональная схема исследования токовых каналов в структуре транзистора

помощью осциллографа по падению напряжения на резисторах R4, R3 и R2 соответственно. Напряжения на этих резисторах при измерениях не превышает 0,1 В. Диод VD1 замыкает ток проводимости канала во время остывания по цепи G2 — R4 — R2 — R1 — VD1 — индуцированный канал эмиттер—коллектор, но исключает шунтирование эмиттера во время протекания греющего тока. Скорость изменения тока генератора G1 равна 20 А/мкс при включении и 10 А/мкс при выключении. Скорость спада напряжения генератора G2 от уровня U_{KT} до уровня U_{KP} равна 100 В/мкс. Энергия греющих импульсов задается амплитудой тока эмиттера до 20 А, длительность импульса до 100 мс, напряжение на коллекторе 300 В. Испытаниям подверглись транзисторы типов КТ3102, КТ361, КТ315, КТ501, КТ503, ГТ309, ГТ313, ГТ402, ГТ404, КТ816, КТ940, ГТ813. Характер наблюдаемых процессов во всех случаях был одинаковым.

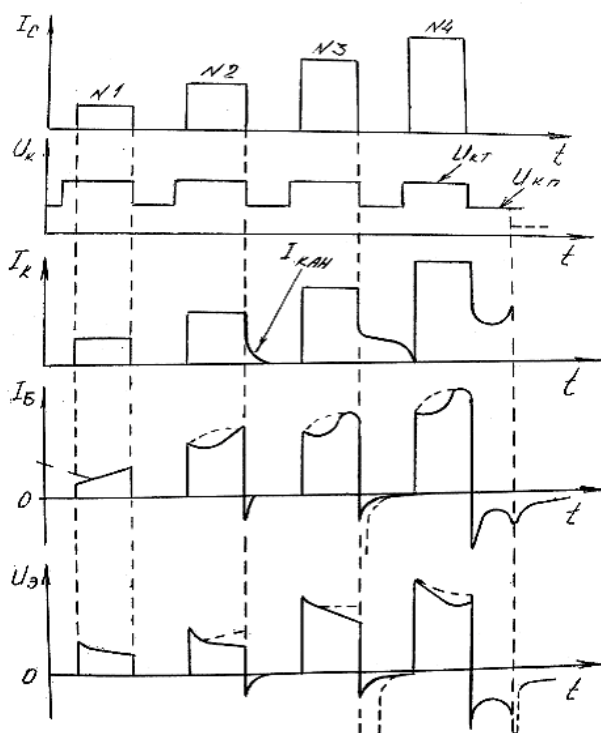


Рисунок 2 — Диаграммы токов и напряжений транзистора при испытаниях одиночными импульсами с нарастающей амплитудой

разогрева (импульс № 4).

Измерения параметров отказавших транзисторов показали, что эмиттерный и коллекторный переходы в целом сохраняют выпрямляющие свойства, но их токи утечки увеличиваются до 0,1...10 мА, а напряжение пробоя уменьшается на 30...50 %. Сопротивление участка коллектор—эмиттер практически линейно на

Функциональная схема исследований показана на рисунке 1.

В эмиттер испытуемого транзистора ИТ задаются импульсы тока от источника G1 с высоким дифференциальным сопротивлением. Питание коллекторной цепи осуществляется с помощью быстродействующего стабилизатора напряжения G2, который во время протекания греющего тока поддерживает напряжение на уровне U_{KT} , а во время паузы — U_{KP} . Напряжение U_{KP} задается независимо от U_{KT} и используется для исследования ВАХ канала проводимости во время остывания. Токи коллектора I_K , ток базы I_B и канала проводимости $I_{кан}$ измеряются с

На рисунке 2 показаны диаграммы токов и напряжений в схеме без учета быстрых процессов перезаряда емкостей и индуктивностей транзистора и схемы.

При протекании греющего импульса № 1 и после его окончания на диаграммах не обнаруживается отклонений от известных представлений о работе транзистора. При протекании греющего импульса тока № 2 также не обнаруживается заметных изменений амплитуды тока коллектора, но после его окончания в цепи коллектор—эмиттер течет ток канала проводимости $I_{кан}$. В цепи базы в это время протекает быстро спадающий импульс тока термогенерации. Необходимо отметить, что характер зависимости тока базы и напряжения на эмиттере (на рисунке 2 показано штриховой линией) при длительности импульса менее 10 мс определяется режимом испытаний. При постепенном увеличении энергии греющих импульсов всегда можно обнаружить такой (импульс № 3), после которого время остывания канала значительно увеличивается. Как правило, перед окончанием такого импульса ток базы начинает уменьшаться, и его производная меняет знак. Дальнейшее увеличение энергии на 5...10 % приводит к катастрофическому отказу транзистора через 5...50 мкс после окончания

уровне 1...100 Ом. При вскрытии транзисторов обнаруживаются радиальные трещины, проплавление кристалла и выгорание металлизации в области локализации мощности рассеивания.

На рисунке 3 показаны пиковые зависимости тока канала $I_{кан}$ от напряжения на коллекторе в паузе $U_{кп}$ и от запирающего напряжения на эмиттере $U_{эг}$. Измерение пиковых значений проводилось через 2 мкс после окончания импульса мощности. Анализ этих зависимостей позволяет предположить инжекционно - полевой механизм ограничения тока. Протекание сквозного тока в это время в цепи коллектор—эмиттер может быть вызвано значительным увеличением сопротивления растекания базы для тока термогенерации.

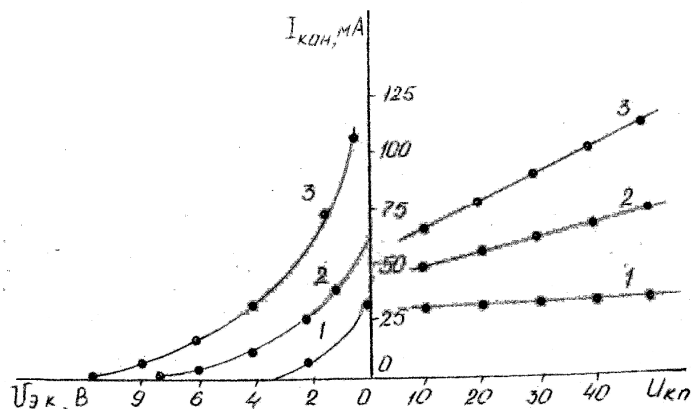


Рисунок 3 — Зависимость амплитуды тока канала от напряжения на коллекторе в паузе и запирающего напряжения на эмиттере для транзистора KT816B, при $U_{кб} = 60$ В и $t_{и}=0,5$ мс (где $I_{кан}$, равное 1 соответствует 1 А; 2 — 1,5 А; 3 — 1,7 А)

Монотонное увеличение проводимости канала по мере увеличения энергии греющих импульсов, показанное на рисунке 4, можно объяснить действием известных демпфирующих факторов. В процессе нагревания транзистора увеличение локальной температуры и плотности тока эмиттера сопровождается уменьшением коэффициента инжекции за счет токотемпературной модуляции проводимости базы и уменьшением коэффициента переноса вследствие компенсации неподвижного заряда в базе подвижными носителями (эффект Кирка).

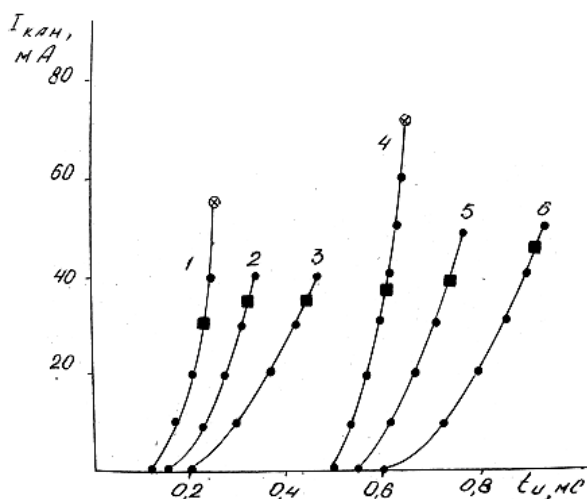


Рисунок 4 — Зависимость амплитуды тока канала $I_{кан}$ от длительности импульсов мощности для транзисторов KT 315Г при $U_{кг} = U_{кп} = 25$ В (зависимости 1, 2, 3) и KT 940А при $U_{кг} = U_{кп} = 200$ В (где $I_{кан}$ для 1 соответствует 220 мА; 2 — 200 мА; 3 — 150 мА; 4 — 350 мА; 5 — 300 мА; 6 — 450 мА; ■ — критерий отказа по $U_{пр}(T)$)

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 разогрева и уменьшается при увеличении напряжения на коллекторе. В-третьих, необходимо учитывать возможность инициализации электрической формы вторичного пробоя 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.

Таким образом, на основании экспериментальных исследований показано, что для отбраковки ненадежных мощных транзисторов в качестве количественной характеристики степени их структурного несовершенства целесообразно использовать величину отклонения индивидуальных ОБР транзисторов от среднестатистической.

Данный метод контроля отличается своим неразрушающим влиянием на биполярный транзистор. Экспериментальные исследования показали (рисунок 4), что уровень воздействующей мощности при использовании в качестве параметра-критерия тока индуцированного канала на порядок ниже, чем у метода неразрушающего контроля на основе измерения $U_{пр}(T)$. Для повышения достоверности метода неразрушающего контроля параметры греющего импульса мощности должны соответствовать профилю мощности в реальном режиме применения транзистора. Данный метод неразрушающего контроля можно распространить и на другие полупроводниковые структуры.

Дальнейшее направление исследований целесообразно направить на реализацию метода неразрушающего контроля устойчивости транзисторов к эффектам шнурования тока для конкретных режимов эксплуатации.

Библиографический список

1. Загряжский Н.В. Исследование границ безопасной работы мощных транзисторов для активных импульсных режимов / Н.В. Загряжский, В.А. Шерстюк, Н.И. Студенков // Электронная техника. Сер.2 ПП приборы. Вып. 2 (175), 1985. — С. 35 — 41.
2. Воробьев И.Г. Надежность работы мощных транзисторов в ключевом режиме / И.Г. Воробьев, Н.Б. Петяшин, А.М. Еськин — Техника средств связи. Сер. ТРС. Вып. 3, 1986. — С. 63 — 66.
3. Рабодзей А.Н. Метод контроля однородности токораспределения в мощных высоковольтных транзисторах / А.Н. Рабодзей. — Электронная промышленность. Вып. 9 (105), 1982.
4. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: пер. с англ.; Под ред. И.В. Грехова. — Л.: Энергоатомиздат. 1986. — 250 с.

Поступила в редакцию 21.04.2008 г.