

Гришаков Михаил Николаевич

**АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И РАЗРАБОТКА
ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
НАДЕЖНОСТИ СВЧ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ**

Специальность 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2010 год.

Работа выполнена в ФГУП «НПП «Пульсар»

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
СИНКЕВИЧ В.Ф.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
ПЕТРОСЯНЦ К.О.

Доктор технических наук
АДОНИН А.С.

Ведущая организация: ОАО «ЛЭМЗ», г. Москва

Защита состоится 28 апреля 2010 г. в 14.00 часов
на заседании диссертационного совета Д 409.004.01 при ФГУП «НПП
«Пульсар» по адресу: 105187, г. Москва, Окружной проезд, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «НПП «Пульсар».

Автореферат разослан «26» марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 409.004.01,
кандидат технических наук

А.Л. Филатов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Важнейшими составными частями обеспечения обороноспособности страны и безопасности воздушного движения над ее территорией являются охрана воздушного пространства, противовоздушная оборона.

Ключевая роль в решении этих задач принадлежит радиолокационным системам и построенным на их основе комплексам, используемым в Радиотехнических войсках ВВС. На рубеже 1990-2000 гг. стало возможным создание полностью твердотельных радиолокационных станций (РЛС) в L- и S-диапазонах длин волн с зеркальными антеннами и активными фазированными антенными решетками. В современных РЛС используется от нескольких десятков до тысячи модулей, причем в каждом передающем модуле до 10 мощных СВЧ транзисторов. Преимущество твердотельных РЛС неразрывно связано с переходом от сосредоточенных к распределенным источникам СВЧ мощности в виде модулей. Применение большого количества СВЧ модулей приводит к повышению живучести станции в целом, поскольку отказ даже 10-20% от общего числа модулей не лишает РЛС работоспособности. При этом становится возможным за счет использования запасных (резервных) модулей и ремонта отказавших обеспечить непрерывную работоспособность РЛС в течение срока службы (10÷25 лет). В этой ситуации крайне актуальной является задача по изучению физики отказов передающих СВЧ модулей и разработке мероприятий по повышению их надежности и, соответственно, живучести РЛС. Физические основы надежности комплектующих изделий (интегральных схем, СВЧ и силовых транзисторов) интенсивно развивались как в России, так и за рубежом [1-5]. Особый вклад в это направление внесли такие ученые, как Аронов В.Л., Диковский В.И., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф., Сыноров В.Ф., Петров Б.К. и др.

Целью работы является исследование причин и механизмов отказов передающих СВЧ твердотельных модулей, возникающих в процессе производства и в реальных условиях эксплуатации, и на этой основе разработка эффективных мер по обеспечению их надежности.

Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс взаимосвязанных теоретических и организационных технических задач:

- исследование причин отказов, определяющих надежность твердотельных СВЧ модулей при работе в составе РЛС;
- построение моделей отказов в импульсно-периодическом режиме работы обусловленных, деградацией металлизации транзисторов;
- разработка эффективных методов отбраковочных испытаний твердотельных СВЧ модулей с учетом реальных режимов их эксплуатации;
- разработка конструктивно-технологических предложений по обеспечению требуемых показателей надежности модулей.

Исследования по теме диссертации проводились в ФГУП НПП «Пульсар» в процессе выполнения ОКР и поставочных работ («Панцирь», «Утес»).

Объектом исследования настоящей диссертации послужили СВЧ модули, созданные для твердотельных РЛС («Панцирь», «Утес»).

Научная новизна.

1. Предложен физический механизм отказов транзисторов в СВЧ модулях, причиной которых являются резкие изменения температуры транзистора вследствие периодических импульсов СВЧ-мощности с заданной скважностью. При этом, возникают импульсные механические напряжения, происходит деградация многослойной металлизации транзисторов, которая завершается тепловым пробоем в транзисторах.

2. Установлено, что с ростом амплитуды мощности и длительности $t_{и}$ при большой скважности Q периодических СВЧ импульсов, число термоциклов и, соответственно, время наработки модулей на отказ, уменьшается в основном за счет роста амплитуды термоциклов.

3. Установлено, что механизм отказов вторичных источников питания в условиях эксплуатации СВЧ модулей связан с токовой перегрузкой, возникновением сквозных токов, перегревом и выгоранием элементов источника питания.

4. Для повышения надежности СВЧ модулей предложено: использовать СВЧ транзисторы с металлизацией на основе Ti-Pt-Au, вместо металлизации Mo-Al (Cu), что позволяет уменьшить разницу температурных коэффициентов расширения металлизационных слоев; обеспечивать амплитуду термоциклов с запасом относительно режимов, допустимых по техническим условиям, за счет контроля импульсного теплового сопротивления транзисторов и выбора импульсной мощности $P_{и}$.

5. Для обеспечения эффективности отбраковочных испытаний СВЧ модулей необходимо при прогоне устанавливать предельно допустимый режим эксплуатации:

- $T_{окр}$ – температура окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$;
- $U_{п макс}$ – максимально допустимое напряжение питания;
- $t_{и макс}$ – максимальная длительность импульсов;
- $Q_{мин}$ – минимально допустимая скважность;
- токовая нагрузка вторичного источника питания должна превышать нормы ТУ.

Достоверность полученных результатов:

Полученные теоретические и практические результаты подтверждаются большим объемом испытаний модулей, использованием адекватных моделей развития отказов в твердотельных СВЧ модулях, эффективным внедрением предложенных методов обеспечения надежности на практике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Основным механизмом отказов СВЧ модулей при работе в импульсно-периодических режимах является развитие усталостных явлений и деградация системы металлизации СВЧ транзисторов, вследствие воздействия на их структуру термоциклов, что приводит к уменьшению напряжения лавинного пробоя $U_{кэр}$ и необратимому тепловому пробоему транзистора.

2. С ростом длительности и амплитуды периодических СВЧ импульсов мощности при больших значениях скважности время наработки на отказ СВЧ модулей резко уменьшается за счет, возрастания амплитуды термоциклов.

3. Отказы вторичного источника питания СВЧ модулей в условиях эксплуатации вызваны воздействием токовой перегрузки и как следствие появлением сквозных токов в силовых транзисторах, перегрева и выгорания элементов источника питания.

4. Для обеспечения требуемых показателей надежности твердотельных СВЧ модулей необходимо:

- использовать транзисторы с системой металлизации на основе Au, вместо металлизации на основе Mo-Al, прошедшие контроль значений $R_{ти}$;
- проводить 100%-ный технологический прогон модулей в предельных режимах, максимально приближенных к условиям эксплуатации;

- проводить контроль перегрева и технологический прогон платы вторичного источника питания;
- в условиях эксплуатации обеспечить запас по амплитуде термоциклов не менее 20% относительно норм ТУ

Практическая значимость.

Практическая ценность диссертации заключается в разработке и внедрении комплекса технических мероприятий по обеспечению требуемых показателей надежности твердотельных СВЧ модулей, используемых в современных радиолокационных станциях различного назначения. К этим мероприятиям относятся:

- рекомендации по конструктивным изменениям СВЧ транзисторов, а также составу отбраковочных испытаний, обеспечивающие устойчивость транзисторов к термоциклированию. В частности, для СВЧ-транзисторов необходима металлизация на основе Ti-Pt-Au, вместо Mo-Al. Устойчивость транзисторов к термоциклированию повышается при отбраковке транзисторов с повышенным R_{Ti} ;
- с целью обеспечения эффективности, отбраковочные технологические испытания СВЧ твердотельных модулей проводят в предельных СВЧ режимах эксплуатации ;
- с целью обеспечения запасов по электрическим и тепловым нагрузкам режимы эксплуатации должны устанавливаться с учетом того, что амплитуда термоциклов ΔT_{\max} не должна превышать 125°C ;
- с целью обеспечения запасов к токовым перегрузкам вторичного источника питания модулей, необходимо проводить контроль перегрева элементов и технологический прогон платы источника питания;

Разработанные рекомендации позволили существенно (на порядок) повысить надежность (среднюю наработку до отказа) СВЧ модулей в изделиях «Панцирь» и «Утес».

Апробация работы.

Содержание и результаты работы доложены и обсуждены на IV международной научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, технике и образовании» г. Пицунда 26-28 сентября 2008 года и VII научно-технической конференции «Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА» г. Москва 07-08 октября 2008 года.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована проблема и определена основная цель работы, обоснована научная новизна полученных результатов, практическая их значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ литературы по оценке и обеспечению основного показателя надежности твердотельных СВЧ модулей средней наработки до отказа t_n , используемых в различных типах РЛС. Рассмотрены возможные механизмы отказов модулей, их связь с конструкцией и режимами эксплуатации. Приведена общая постановка исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований основных причин и механизмов отказов СВЧ модулей. Приведены статистические данные по отказам СВЧ модулей по результатам изготовления и опытной эксплуатации двенадцати комплектов изделий 1РС1-1Е («Панцирь»), а также по результатам изготовления и серийной эксплуатации, восьми станций «Утес». Анализ модулей, отказавших при проведении испытаний в процессе производства и эксплуатации, показал:

- подавляющее число отказов связано со скачкообразным снижением уровня СВЧ мощности на выходе модуля;
- это снижение происходит вследствие отказа СВЧ транзистора или источника питания;
- отказ транзистора связан с локальным разрушением структуры и оплавлением металлизации;
- время наработки до возникновения отказа колеблется в широких пределах от десятка до нескольких тысяч часов.

Особенностью наблюдаемых отказов является то, что внезапный (катастрофический) пробой транзистора происходит после определенного времени работы модуля, которое заведомо превышает время установления стационарного теплового режима. При этом по внешним характеристикам модуля (в частности, излучаемой мощности) предсказать данный отказ невозможно. Эти экспериментальные факты заставляют искать механизм постепенной деградации структуры СВЧ транзистора, которая завершается катастрофическим пробоем с локальным проплавлением Si материалом металлизации. Используемые в модулях СВЧ транзисторы имели металлизацию Mo-Al с добавкой меди для повышения ее устойчивости к электромиграции. Действительно, при анализе структуры отказавших транзисторов с помощью РЭМ были обнаружены наряду с проплавлением структуры транзистора наруше-

ния структуры и целостности металлизации, обусловленные усталостными явлениями в металлизации и окисле (рис.1).

Данный механизм деградации объясняется тем, что в режиме мощных радиоимпульсов имеют место существенные колебания температуры в структуре транзистора. В конце импульса температура в структуре достигает $T_{\text{макс}}$, а в паузе между импульсами – $T_{\text{мин}}$ (рис.2).

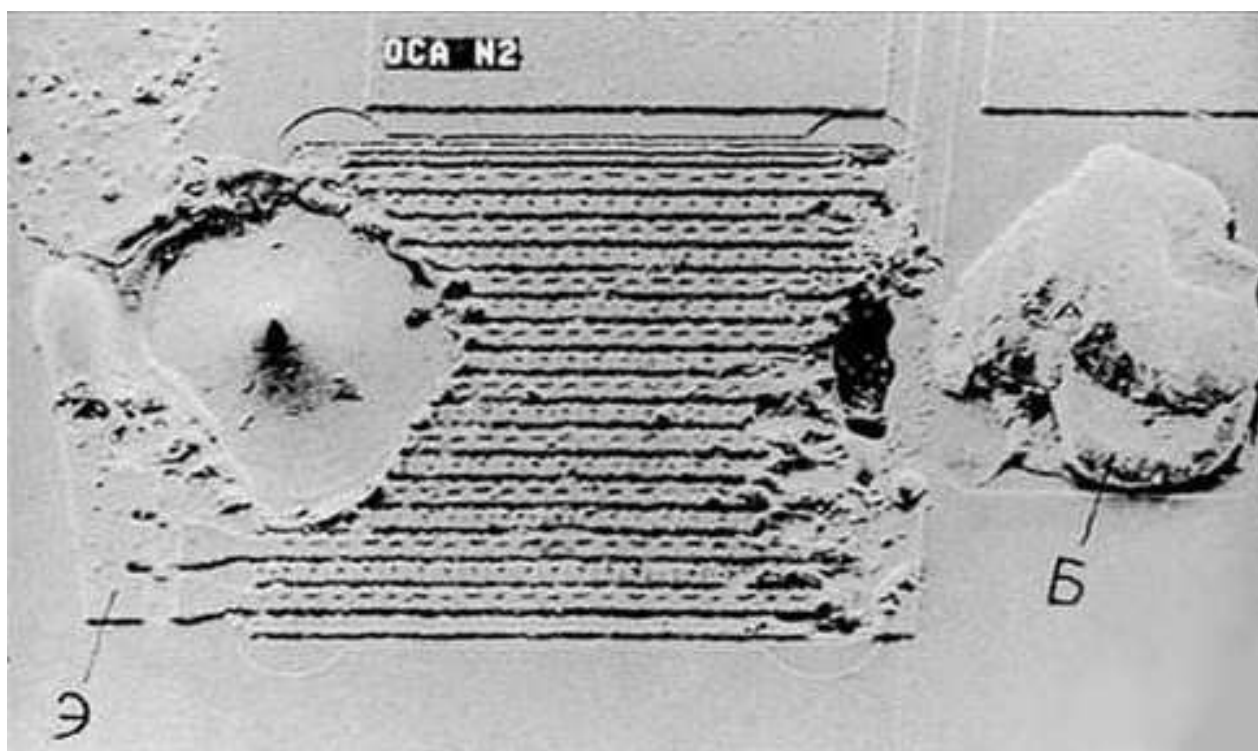


Рис.1 Структура СВЧ-транзистора после пробоя

Значение $T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}} = \Delta T$ может достигать $80 \div 120^\circ\text{C}$, а количество циклов за время работы транзисторов при периоде $t_0 \approx 1\text{мс}$ составляет $N \approx 10^{12}$. В результате такого воздействия и различия температурных коэффициентов расширения слоев, расположенных на поверхности полупроводникового кристалла (кремний, окисел, многослойная металлизация Mo-Al, окисел), в них возникают циклически изменяющиеся механические напряжения. Вследст-

вие циклического воздействия механических напряжений происходит постепенное ухудшение адгезии между полоской металлизации и пленкой SiO_2 или подложкой Si, а затем – обрыв пленки металла (наблюдаемый на отказавших структурах). Время развития этого процесса резко уменьшается с ростом $\Delta T = (T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}})$.

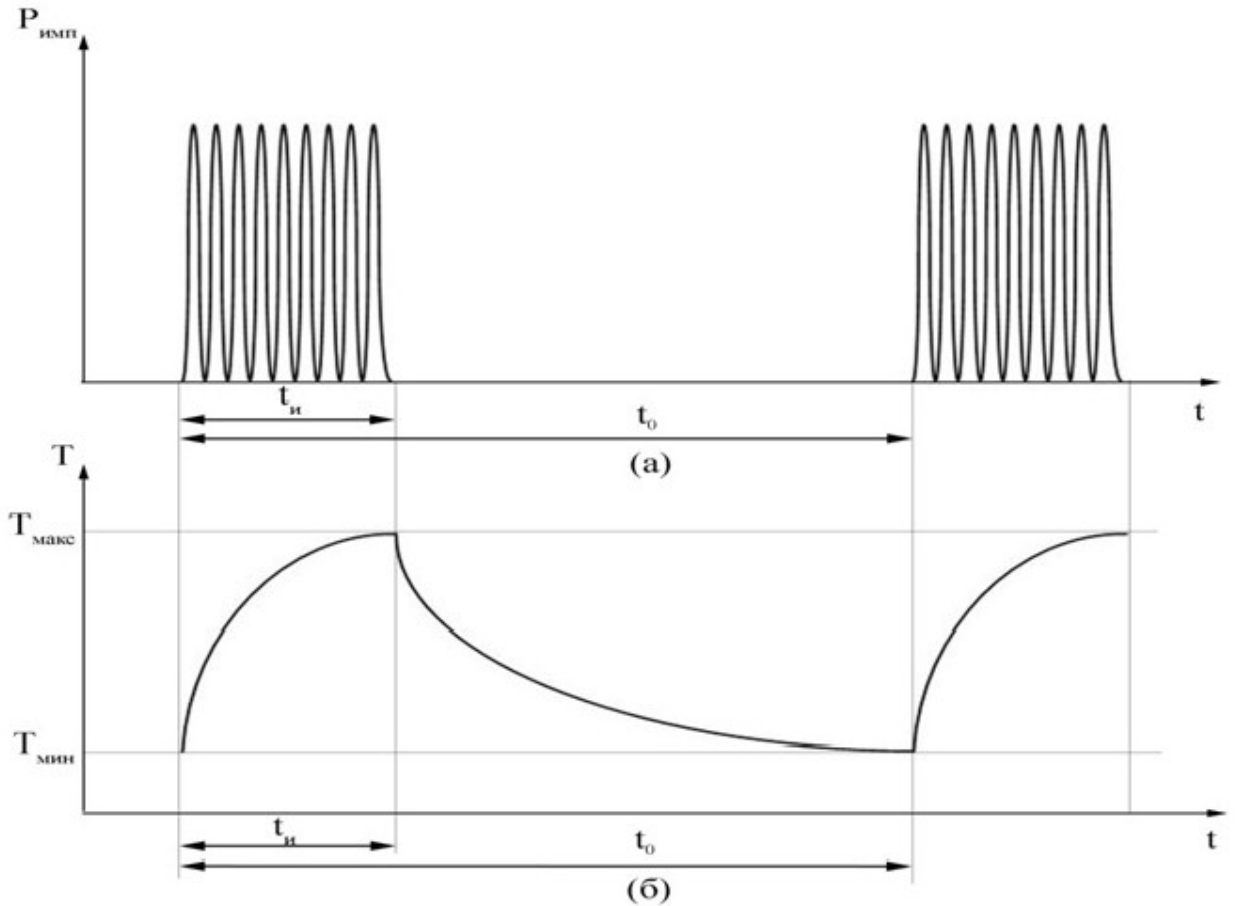


Рис.2 Импульсно-периодический режим работы транзистора (а) и характер изменения температуры кристалла в этом режиме (б)

В СВЧ модулях для РЛС транзисторы работают в схеме с общей базой, причем, в паузе после окончания радиоимпульса эмиттерный и базовый выводы оказываются закороченными, а напряжение питания $U_{\text{п}}$, подаваемое между коллектором и базой, составляет $28 \div 32\text{В}$ (рис.3).

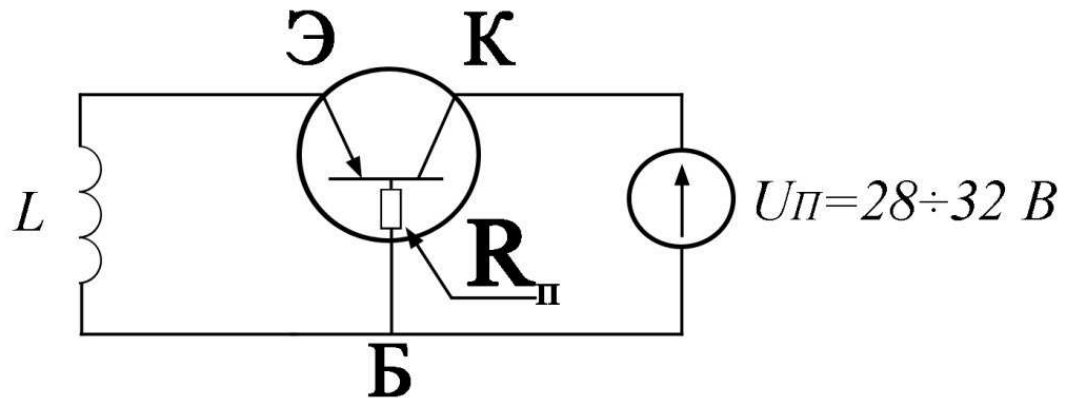


Рис.3 Схема включения транзистора в паузе между радиоимпульсами.

Если в такой схеме сопротивление в цепи базы близко к нулю, то пробивное напряжение будет совпадать с напряжением лавинного пробоя коллекторного перехода $U_{кбо}$, которое заметно (в несколько раз) превышает напряжение питания транзистора. Если вследствие термоциклов базовая металлизация оборвется или отслоится от Si подложки в ряде участков структуры, то очевидно, что в локальном участке структуры появится паразитное базовое сопротивление $r_{бп}$ (рис. 3), отличное от нуля, а ВАХ транзистора приобретает S-образный вид (рис.4). При этом как только напряжение $U_{кэг}$, при котором $R = dU_{кб}/dI_{к} \leq 0$ по мере роста $r_{бп}$ становится меньше $U_{П}$, происходит скачкообразное увеличение тока (переход а→б) через СВЧ транзистор во время паузы между импульсами и как следствие – его необратимый тепловой пробой (переход б→в), о чем свидетельствует локальное оплавление металлизации – образование кратера. Причем, время паузы между импульсами составляет порядка 1мс, что вполне достаточно для развития этого пробоя.

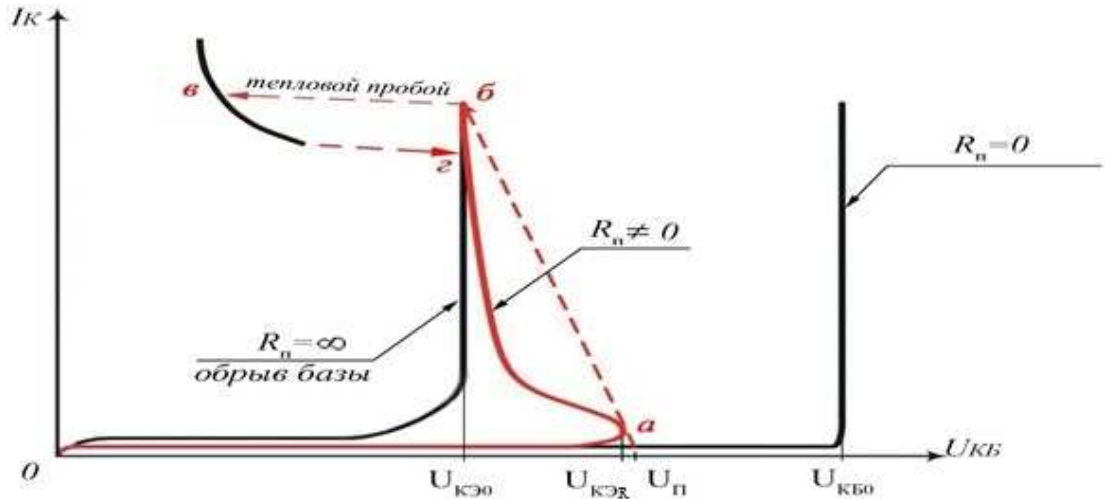


Рис.4 ВАХ транзистора при различном значении паразитного сопротивления R_n в цепи базы

(--- переход а—б транзистора из режима отсечки (точка а) в режим больших токов (точка б) при $U_{II} > U_{кбР}$)
 (--- переход б—в тепловой пробой)

Для подтверждения предложенного механизма отказов СВЧ транзисторов были проведены испытания пятнадцати штук транзисторов с металлизацией Mo-Al(Cu) в импульсно-периодическом режиме ($t_n = 500\text{мкс}$, $Q=7$, при $U_{кб} = 10\text{В}$, $T_{кор} = 125^\circ\text{С}$, $\Delta T \approx 80^\circ\text{С}$ в течение 3000 часов.) Контроль ВАХ транзисторов после испытаний показал наличие у двух транзисторов S-образной характеристики между коллектором и базой при закороченных эмиттере и базе. В реальной схеме включения транзисторов в СВЧ модуле такая деградация неизбежно приведет к тепловому пробую транзистора во время паузы между импульсами, если $U_{II} \geq U_{кбР}$, при котором $dU_{кб} / dI_{к} \leq 0$ (рис.4).

Интересен и другой факт: один из модулей, проработавший без отказов в РЛС в течение нескольких тысяч (~5000) часов, был разгерметизирован, и все десять СВЧ транзисторов были демонтированы. Контроль ВАХ транзисторов показали отсутствие деградации. Таким образом, как уже отмечалось ранее, при эксплуатации СВЧ модулей в составе РЛС наблюдался большой разброс времени наработки t_n до возникновения отказов вследствие уменьшения СВЧ мощности на выходе модуля за счет отказа одного или нескольких транзисторов. Учитывая предложенный механизм развития наблюдае-

мых отказов (переход от деградации к катастрофе), существенный разброс времени наработки до отказа можно объяснить тем, что число термоциклов N_γ , при достижении которого наступает катастрофический отказ определенного процента γ , работающих в составе РЛС СВЧ транзисторов, резко зависит от ряда конструктивных и технологических факторов, которые неизбежно имеют разброс от прибора к прибору. Среди этих факторов в первую очередь следует отметить амплитуду термоциклов $\Delta T = R_{\text{ти}} P_{\text{и}}$.

Изменения ΔT определяются разбросом теплового импульсного сопротивления $R_{\text{ти}}$ и разбросом значения импульсной мощности $P_{\text{и}}$ (последнее зависит от настройки режима работы транзистора).

Для повышения устойчивости металлизации СВЧ транзисторов к воздействию термоциклов необходимо заменить металлизацию Mo-Al с добавкой меди на металлизацию Ti-Pt-Au. Это позволило уменьшить разницу величин температурных коэффициентов расширения слоев (см. таблицу) и, соответственно, повысить устойчивость металлизации к термоциклированию.

Температурные коэффициенты расширения материалов металлизации

A ($\times 10^6$ град $^{-1}$)

Si	SiO ₂	Al	Mo	Ti	Pt	Au
2,4	0,45	24	5,3	8	10	14,5

Порядка 60% отказов модулей станций 1РС1-1Е («Панцирь») и «Утес» связаны с отказами вторичного источника питания (ВИП). Анализ показал, что причиной отказов является перегорание токоведущей дорожки на стеклотекстолитовой плате и (или) отказ силовых транзисторов. Статистические данные по отказам источника питания в модулях высокочастотных усилите-

лей мощности (ВУМ) при технологическом прогоне и опытной эксплуатации 12-ти изделий 1РС1-1Е приведены на рисунке 5.

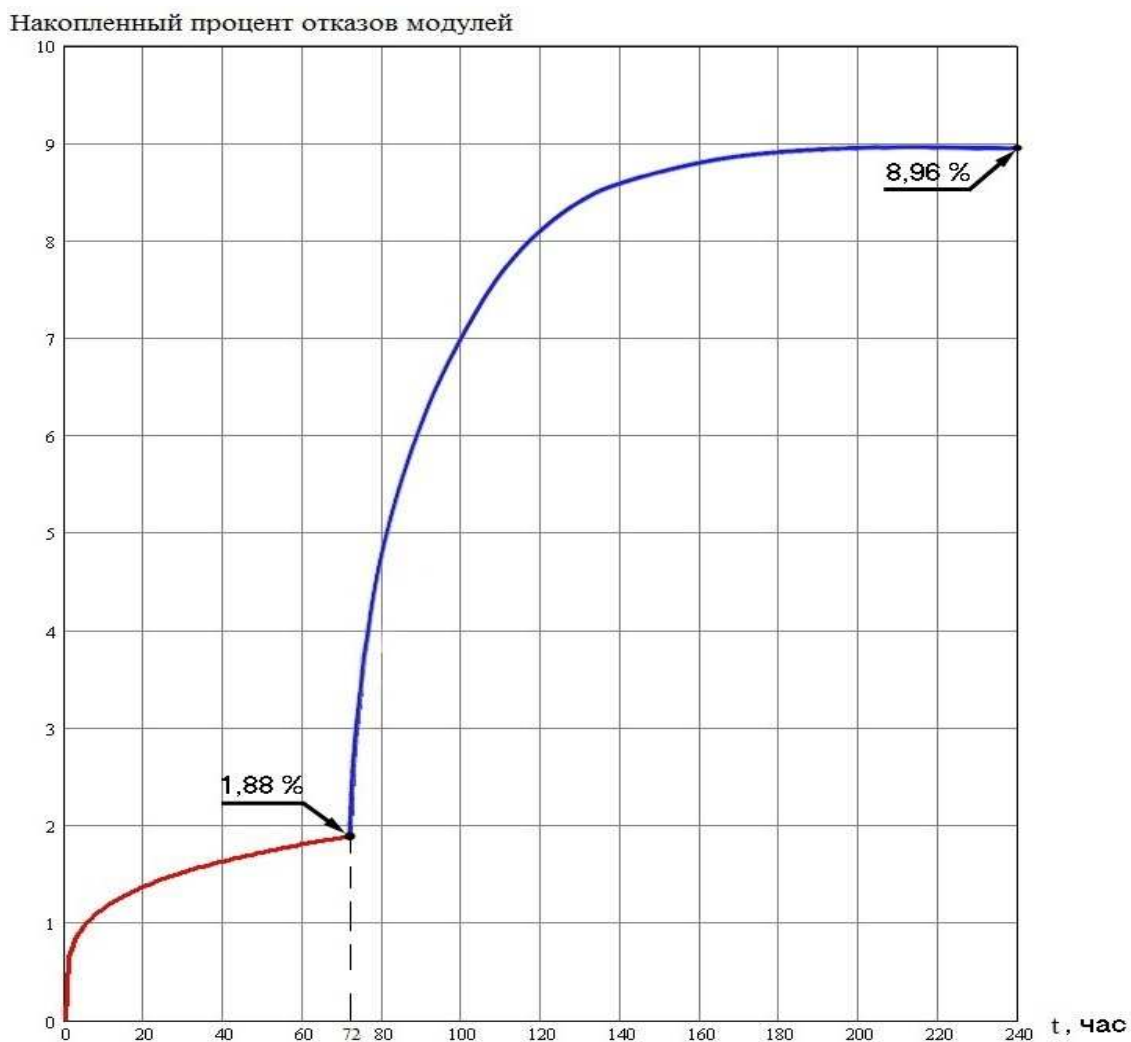


Рис. 5. Статистические данные по отказам источника питания в модулях ВУМ при технологическом прогоне (72 ч.) и опытной эксплуатации 12-ти изделий 1РС1-1Е (480 модулей).

С целью установления механизма отказов был проведен расчет зависи-

мости перегрева ΔT токоведущей дорожки источника питания ВУМ от тока I , протекающего через дорожку в статическом режиме (при различном значении R_T (см. рис. 6) для модулей «Панцирь», а также анализ перегрева элементов, расположенных на плате источника вторичного питания, в зависимости от тока нагрузки.

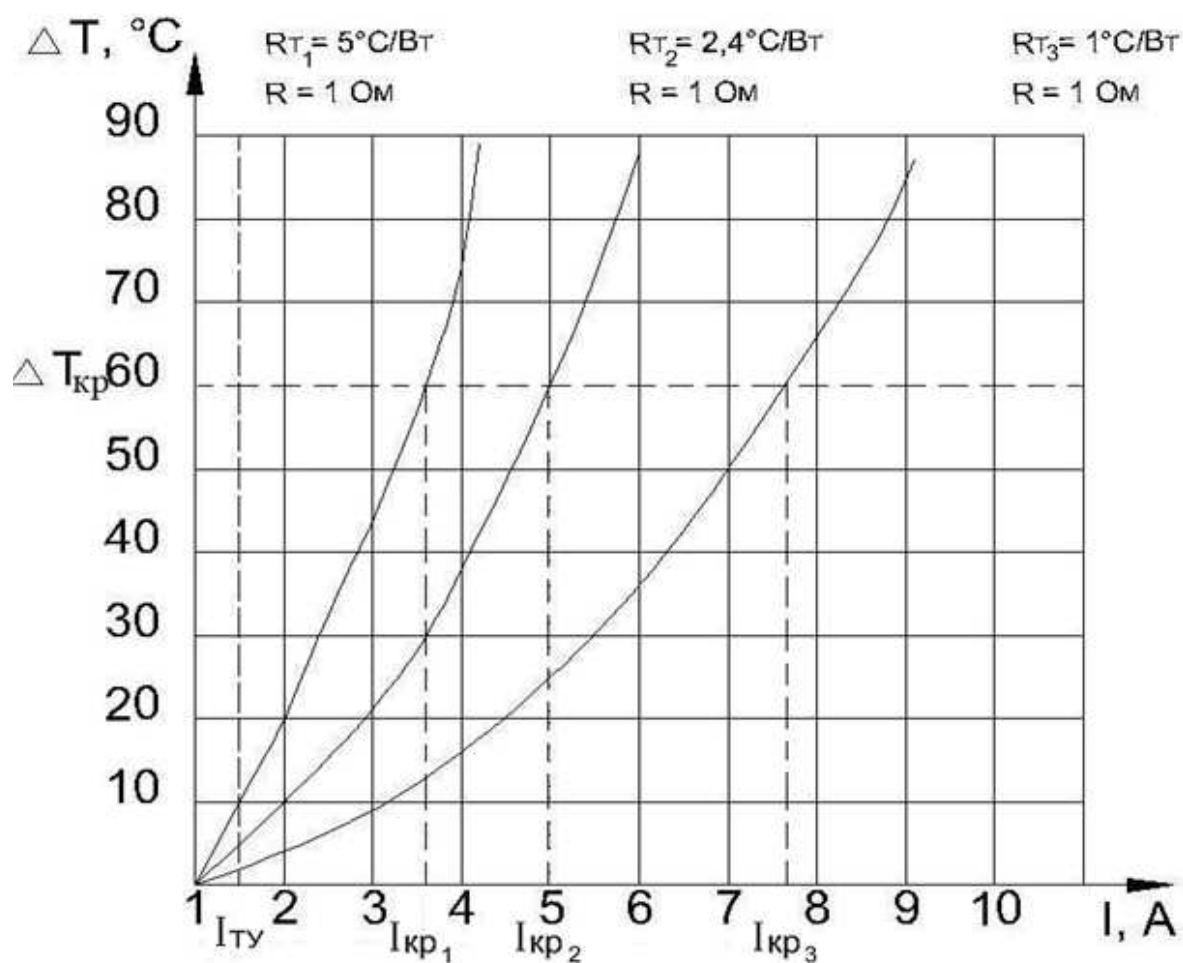


Рис. 6. Зависимость перегрева токоведущей дорожки источника питания ВУМ от тока I при различных R_T (где R – сопротивление токоведущей дорожки, $I_{ТУ}$ – ток допустимый по ТУ, $I_{кр}$ – ток, при котором достигается

максимально допустимый перегрев $\geq 145^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = R_T I^2 = 60^{\circ}\text{C}$,

$$T_{\text{окр.}} = 80 \dots 90^{\circ}\text{C}.$$

Результаты анализа перегрева элементов вторичного источника питания и расчет показывают, что причиной перегорания токоведущей дорожки является перегрузка источника питания по току потребления относительно норм ТУ в процессе эксплуатации модулей. Другой причиной подобных отказов является возникновение сквозных токов, что наиболее характерно для модулей «Оса».

В третьей главе проведен анализ скорости развития отказов от параметров режима работы, обусловленных усталостными явлениями в металлизации СВЧ транзисторов. Представляет большой практический интерес оценка зависимости времени наработки до отказов t_H и, соответственно, числа термоциклов $N_{кр}$, при достижении которых наступает отказ, от величины амплитуды ΔT термоцикла и величины абсолютного значения температуры металлизации транзистора T . При этом, под значением T в импульсно-периодическом режиме принимаем среднее значение температуры, относительно которого происходят температурные колебания от $T_{\text{макс}}$ в конце импульса до $T_{\text{мин}}$ в конце паузы (Рис. 2.).

Оценка амплитуды механического напряжения $\Delta\delta$, возникающего в металлизационной пленке, показывает:

$$\Delta\delta = \Delta T(\alpha_f - \alpha_s) \cdot E_M, \quad (1)$$

где α_f , α_s – средние коэффициенты расширения для пленки и подложки, E_M – модуль упругости пленки.

Если считать, что амплитуда изменения температуры на поверхности кристалла ΔT составляет 100°C , то напряжение $\Delta\delta$ имеет порядок 10^8 Н/м^2 . Эта величина близка к статическому пределу текучести δ_T для Al. Цикличе-

ские изменения напряжения с амплитудой $\Delta\delta$ приводят к нарушению адгезии на границе раздела металл-полупроводник и металл-окисел и последующему разрушению металлизации.

Обычно износ и отказ полупроводниковых модулей при воздействии термоциклов может быть описан с помощью распределения Вейбулла. Вероятность возникновения отказа модуля по Вейбуллу[2]:

$$\Phi(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{N_c}\right)^\beta\right], \quad (2)$$

где $\Phi(N)$ - процент модулей (отношение числа отказавших модулей n_0 к общему числу n испытуемых модулей n_0/n), вышедших из строя после N – температурных циклов, связанных с импульсно периодическим режимом работы, N_c - масштабный параметр распределения Вейбулла, β - параметр формы.

Чем выше N_c тем больше число циклов N выдержит модуль до отказа, и чем выше β , тем меньше время между двумя отказами.

Известно, что число циклов N_γ , после которых наступает определенный процент γ отказов модулей, связано с амплитудой температурного цикла

$$N_\gamma = k_1 \Delta T^{-k_2}, \quad (3)$$

где $\Delta T = T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}$ амплитуда цикла, имеющая максимальное значение на поверхности структуры мощных СВЧ транзисторов модуля, k_1 - масштабный параметр и k_2 - параметр формы для формулы Коффина-Менсона [4]: параметры k_1 и k_2 должны определяться экспериментально на основе испытаний, по крайней мере, двух выборок модулей при различном значении ΔT , причем значение коэффициента k_1 уменьшается с ростом абсолютного значения температуры T . Приведенные формулы (2), (3) полностью описывают получен-

ные экспериментальные результаты, накопленные при эксплуатации различных СВЧ модулей.

Особое значение приобретает изучение режимов и условий работы СВЧ транзисторов в передающих модулях, как основного элемента, определяющего их надежность. С этой целью в настоящей работе проведены расчеты амплитуды термоциклов в структуре мощных СВЧ транзисторов, возникающих в импульсных периодических режимах работы, характерных для работы модулей в составе РЛС различного назначения.

Общий вид структуры мощного СВЧ транзистора приведен на рис. 7.

Структура транзистора содержит шесть кристаллов Si, каждый из которых имеет поверхностный источник тепла (коллекторный p-n переход) размером (30 мкм x 688 мкм). Дискретность источника тепла не учитывается. Мощность поверхностных источников тепла задается в виде периодической последовательности импульсов с длительностью $t_{\text{и}}$ и скважностью Q . Отводом тепла от поверхности кристалла пренебрегаем. Считаем, что медное основание корпуса транзистора находится на идеальном теплоотводе с температурой T_0 .

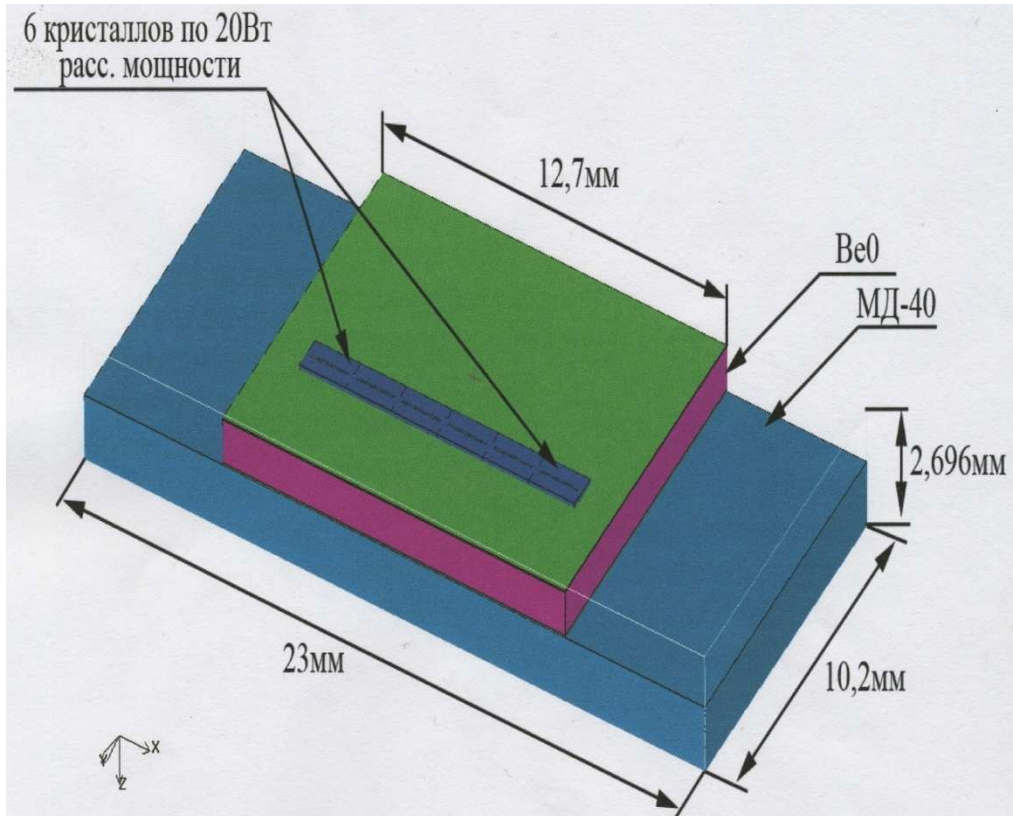


Рис.7. Структура мощного СВЧ транзистора

Основной целью является расчет теплового сопротивления транзисторной структуры в импульсном режиме

$$R_{ТИ} = \frac{T_{Имакс} - T_0}{P_{И}},$$

где $T_{Имакс}$ – максимальная температура на поверхности структуры в заданном установившемся режиме ($t_{и}$, Q , $P_{и}$), $P_{и}$ – импульсное значение рассеиваемой мощности в поверхностном источнике тепла. При этом важно знать зависимость $R_{ТИ}$ от параметров структуры транзистора и от параметров режима.

Для этого использовалась расчетная программа, разработанная П.В. Тараном на ФГУП НПП «Пульсар» и позволяющая рассчитывать тепловые поля, как в стационарном, так и импульсном режиме работы транзистора. Скорость и точность машинных расчетов сильно зависит от выбора расчетной сетки. Трехмерная модель транзистора разбивается на множество объем-

ных фигур. Очевидно, что чем больше количество таких фигур (расчет ведется в вершинах этих фигур), тем меньше погрешность расчетов. Однако увеличение количества объемных элементов ведет к увеличению времени счета. В данной работе использовалась расчетная сетка, состоящая из $0,5 \cdot 10^6$ объемных элементов. Дальнейшее увеличение числа элементов приводило к большей точности расчетов в третьем знаке.

Стационарный режим соответствует случаю, когда в поверхностном источнике тепла выделяется постоянная, не зависящая от времени мощность $P_{ст}$. При этом, значение $R_{Тст}$ является функцией геометрических размеров и электрофизических параметров модели транзистора. При расчетах $R_{Тст}$ использовалась формула $R_{Тст} = (T_{макс} - T_0)/P$, где $T_{макс}$ - максимальная температура в центре поверхностного источника тепла.

В работе представлены расчетные зависимости $R_{Тст}$ от геометрических размеров источника тепла l, W (где l – длина, W – ширина, h - толщина слоев) Si , бериллиевой керамики и медного основания.

Проведены расчеты и получена зависимость $R_{Тст}$ для одного полупроводникового кристалла имеющего источник тепла состоящий из 276 поверхностных источников (длиной l , шириной W и расстоянием между ними h).

Рассмотрен случай, когда мощность, выделяемая в поверхностном источнике тепла представляет собой одиночный импульс длительностью $t_{и}$. При $t_{и} \rightarrow \infty$ значение теплового сопротивления в режиме одиночного импульса $R_{ТИ} \rightarrow R_{Тсм}$.

Время достижения $R_{Тст}$, а также время температурной нормализации структуры после выключения импульса в первую очередь определяется суммарной толщиной всех слоев структуры (h_{si} , h_{BeO} , h_{Cu} и т.д.).

Для сравнения также приведены расчетные кривые, полученные в соответствии с известной аналитической формулой

$$R_{ти}^* = \frac{2a}{S\lambda\sqrt{\pi}} \sqrt{t_{и}} ,$$

где a - коэффициент температуропроводности ($a_{Si} \approx a_{BeO} \approx 0,8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1/2}$),
 λ - удельная теплопроводность ($\lambda_{Si} = 1,3 \text{ Вт/смК}$). Установлено хорошее соответствие теории и машинных расчетов, S -площадь структуры.

Наибольший интерес на практике представляет случай, при котором мощность, выделяемая в поверхностном источнике тепла транзисторной структуры, представляет собой периодическую последовательность импульсов длительностью $t_{и}$ и скважностью Q . При этом важно понять в каких режимах значение перепада температур ΔT (термоцикла) от максимального значения в конце импульса $T_{\text{макс}}$ до минимального в конце паузы между импульсами $T_{\text{мин}}$ достигает наибольших значений. Для общего случая значение ΔT можно оценить по полученной нами формуле:

$$\Delta T = P_{и} \left\{ \frac{R_{\text{тсм}}}{Q} + R_{ти}^*(t_{и}) \frac{Q-1}{Q} - R_{ти}^* \left(t + \frac{t}{Q-1} \right) + R_{ти}^*(t) \right\}, \quad (4)$$

где t – время паузы между импульсами: ($t = t_{и}(Q-1)$, $t + t_{и} = Q(t_{и})$,

$t_{и} = \frac{t}{Q-1}$; Выражение (4) справедливо при $Q \geq 3$.

Установлено хорошее соответствие расчетных данных по формуле 4 и машинных расчетов зависимости ΔT от Q и $t_{и}$; Отличие не превышает 15%.

При уменьшении скважности значение ΔT стремится к нулю. В то же время, при $Q \geq 20$, когда время паузы между импульсами оказывается достаточным для полного остывания транзисторной структуры, значение ΔT оказывается максимальным и его величина растет при увеличении длительности импульса $t_{и}$ (см.рис.8).

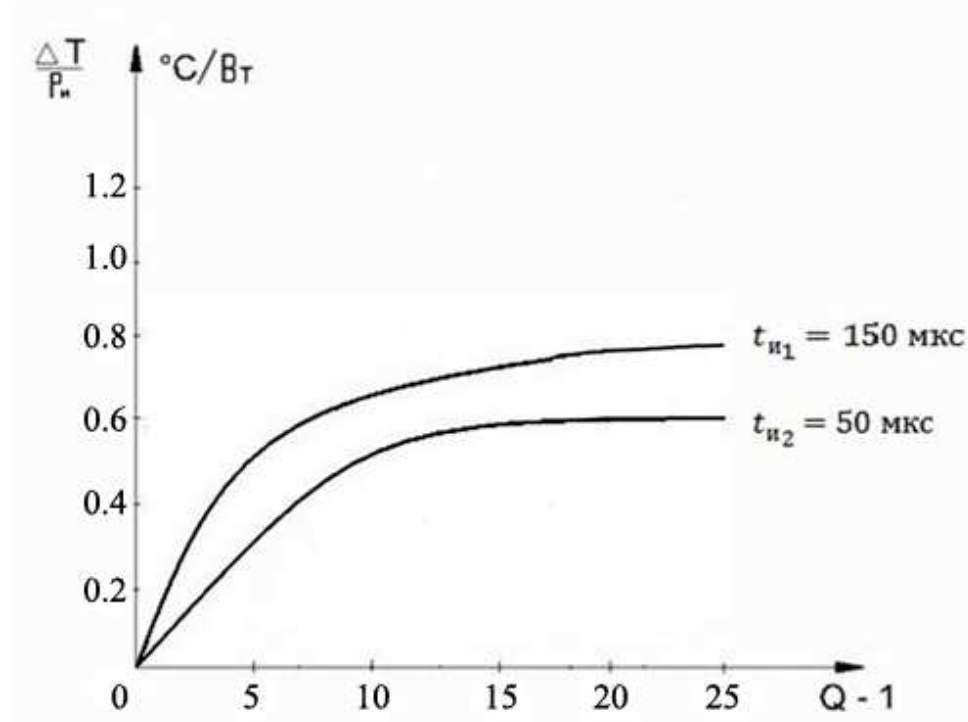


Рис.8. Расчетные зависимости $\frac{\Delta T}{P_n}$ от Q и t_n .

На основании изложенного с учетом формул (3), (4) зависимость N_γ от ΔT можно представить в следующем виде:

$$N_\gamma = \frac{k_1}{\left\{ P_{И} \left[\frac{R_{Тсг}}{Q} + R^*_{ТИ}(t_n) \frac{Q-1}{Q} - R^*_{ТИ}(t + t_n) + R^*_{ТИ}(t) \right] \right\}^{k_2}}$$

Резкая зависимость накопленного числа отказов от амплитуды термоциклов ΔT наблюдалась при эксплуатации РЛС «Утес-А» и «Утес-Т». Для РЛС «Утес-А» длительность импульсов $t_n = 73 \mu\text{с}$, скважность $Q = 27$, импульсная мощность $P_{И} = 1 \text{ кВт}$, напряжение питания $U_n = 28 \text{ В}$. Для РЛС «Утес-Т» длительность импульсов $t_n = 133 \mu\text{с}$; $Q = 20$, $P_{И} = 1,3 \text{ кВт}$, $U_n = 31 \text{ В}$, т.е. для последнего режима амплитуда термоциклов ΔT в $\sim 1,4-1,6$ раза больше чем для первого режима. При этом наблюдаемое экспериментальное значение накопленного процента отказов модулей в течение пяти лет непрерывной экс-

плуатации станций отличается более чем на один порядок, за счет различных значений ΔT .

В четвертой главе представлены технические мероприятия, направленные на обеспечение требуемых показателей надежности СВЧ твердотельных модулей. К этим мероприятиям относятся:

- обеспечение на этапе разработки запасов по предельным тепловым режимам работы мощных СВЧ транзисторов в составе модулей за счет выбора параметров режима работы: $P_{и}$, Q , $t_{и}$, $U_{п}$;
- использование при производстве СВЧ транзисторов с Au металлизацией, вместо металлизации Mo-Al прошедших контроль по величине $R_{ти}$;
- проведение 100% технологического прогона модулей в предельных режимах эксплуатации;

Для повышения запасов по режимам эксплуатации надежности вторичного источника питания модулей предложены и внедрены следующие мероприятия:

- увеличена токовая нагрузка вторичного источника питания относительно норм ТУ при технологических прогонах модулей;
- выбрана марка стеклотекстолита с более высокой теплопроводностью и большей толщиной металлизированных дорожек;
- введена отбраковка плат источников питания при повышенной температуре окружающей среды по величине перегрева сердечника трансформатора;
- внедрены мероприятия по повышению устойчивости к возникновению сквозных токов за счет увеличения времени задержки между моментом включения и выключения силовых транзисторов во вторичном источнике питания.

Используя методы отбраковочных испытаний СВЧ модулей на этапе изготовления серийных образцов, можно выявить и отбраковать изделия со скрытыми дефектами. Вследствие чего, при эксплуатации, число ранних отказов модулей, связанных с наличием скрытых дефектов, может быть заметно уменьшено. Поэтому выбор методики и режимов отбраковочных испытаний, обеспечение их эффективности для твердотельных СВЧ модулей, предназначенных для РЛС различного назначения, является актуальной научной задачей имеющий большое практическое значение.

Выбор наиболее эффективных видов воздействия внешних факторов основывается на том, что каждый из них инициирует проявление определенных типов дефектов, которые преобладают в модулях, изготавливаемых по определенному технологическому процессу. К типичным видам производственных дефектов относятся: дефекты изготовления плат, дефекты сборки, монтажа плат и блоков, дефекты пайки, дефекты комплектующих изделий и др.

Воздействие циклически изменяющейся температуры приводит к деформации и механическим напряжениям в элементах аппаратуры и способствует проявлению механических дефектов: растрескиванию и расслаиванию покрытий, разрыву паяных соединений и швов в корпусе СВЧ модуля. С ростом градиентов температуры влияние этих дефектов возрастает, особенно на границе деталей с различным коэффициентом теплового расширения.

Вибрация (удары) способствует выявлению дефектов, связанных с неудачными конструктивными решениями и технологическим процессом, вибрация приводит к возникновению механических напряжений и усталостных повреждений.

Воздействие повышенной температуры и электрического режима, эквивалентного режиму эксплуатации СВЧ модулей (технологический прогон), приводит к отказам дефектных комплектующих изделий, а также межсоеди-

нений. Поскольку режим работы СВЧ модулей импульсно-периодический, то в процессе технологического прогона одновременно происходит термоциклирование, в первую очередь, структуры активных, тепловыделяющих элементов, возникают значительные градиенты температуры. Поэтому данный вид отбраковочных испытаний твердотельных СВЧ модулей играет определяющее значение для данного класса аппаратуры. Исследования, позволяющие выбрать режим и условия проведения технологического прогона твердотельных СВЧ модулей, обеспечивающие высокую эффективность отбраковки (K_e - отношение количества отказов, выявленных в процессе отбраковки к суммарному количеству отказов, выявленных в процессе отбраковки на приемосдаточных, периодических испытаниях и эксплуатации), являются крайне важным фактором обеспечения качества поставляемых заказчику модулей.

При установлении режима и условий технологического прогона СВЧ модулей выбору подлежат следующие основные параметры:

- $t_{и}$ – длительность импульсов СВЧ мощности;
- Q – скважность импульсов СВЧ мощности;
- $P_{и}$ – мощность, рассеиваемая в течение импульса;
- $T_{окр}$ – температура окружающей среды (воздуха) на входе системы принудительного охлаждения;
- ток потребления вторичного источника питания;
- напряжение питания модуля $U_{п}$, а также время периодического включения $t_{вкл}$ и выключения $t_{выкл}$ модуля в процессе прогона.

Режимы отбраковочных испытаний необходимо устанавливать максимально близкими к предельно допустимым, чтобы выявить все скрытые дефекты модулей. Для обоснования и выбора такого режима следует привлечь статистическую модель возникновения отказов, рассмотренную в главе 3.

На основе анализа формулы (3), с учетом известного факта, что при одинаковом ΔT , износые (усталостные) отказы наступают раньше, если значение $T_{\text{мак}}$ выше, можно сформулировать требования к параметрам режима технологического прогона модулей, при котором, будет выявлен наибольший процент дефектных изделий. Эти требования сводятся к следующим:

- значения $P_{\text{и}}$, Q , $t_{\text{и}}$, $T_{\text{окр}}$ устанавливаются равными максимально допустимым значениям по ТУ, чтобы обеспечить максимальное значение ΔT ;
- напряжение питания при технологическом прогоне задают на 10-20% превышающим значение, установленное в ТУ;
- время работы модуля во включенном состоянии должно превышать время достижения теплового равновесия в структуре активных элементов СВЧ режима (как правило, составляет несколько часов);
- время нахождения модуля в выключенном состоянии должно быть не менее времени охлаждения активных тепловыделяющих элементов до температуры окружающей среды (как правило, составляет до 10 минут).
- ток потребления вторичного источника питания при технологическом прогоне должен на 20-30% превышать значение, установленное в ТУ.

Для реализации технологического прогона СВЧ модулей в указанном режиме были разработаны и изготовлены стенды, обеспечивающие задание импульсно периодического СВЧ режима; охлаждение модулей воздухом с заданной температурой и скоростью; одновременное испытание (прогон) нескольких (от 4 до 8 шт.) модулей; периодическое включение и выключение модулей во время испытаний.

Результаты испытаний в обобщенном виде представлены на рис.9.

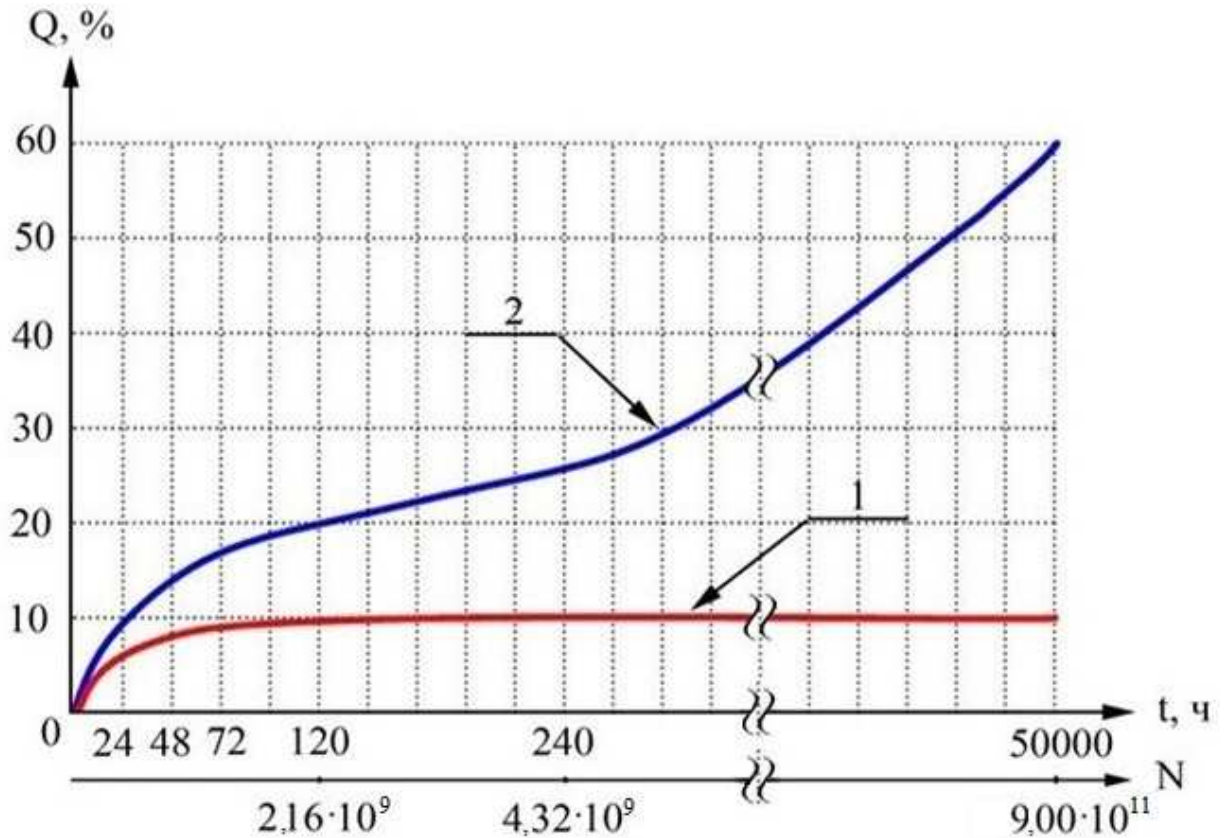


Рис.9. Зависимость накопленного процента отказов в партии СВЧ-модулей от времени наработки t и числа термоциклов N :

1. Партия с допустимым процентом отказов.
2. Партия с процентом отказов выше допустимого и малым конструктивным запасом.

Зависимость накопленного процента отказов γ от N хорошо описывается законом Вейбулла [2]. При этом для модулей разного типа параметры N_c и β различны. Если партия модулей обладает высоким уровнем качества и имеет конструктивно-технологические запасы относительно предельных режимов, то зависимость γ от $N(t)$ имеет форму 1 рис. 9. В отличие от обычного закона Вейбулла эта зависимость имеет участок насыщения. Это свидетельствует о том, что процент дефектных модулей в партии ограничен и через некоторое время, соответствующее определенному числу термоциклов N активных элементов, отказы прекращаются. В зависимости от качества изгото-

товления модулей накопленный процент отказов за время технологического прогона колеблется от 0 до 10%, причем насыщение процента отказов происходит, как правило, в первые трое суток, что соответствует $N \approx 240$ миллионов термоциклов. При достижении некоторого времени наработки t_γ (и, соответственно, N_γ), которое может составлять 5÷7 лет эксплуатации, ресурс модулей заканчивается, и скорость увеличения максимального процента отказов заметно увеличивается.

Если партия модулей обладает низким уровнем качества и практически не имеет конструктивно-технологического запаса относительно предельных режимов, в которых проводится технологический прогон, накопленный процент отказов за первые трое суток достигает 20÷30% (см. кривую 2, рис. 9), и при увеличении времени прогона процент отказов продолжает расти. В последнем случае без принятия дополнительных мер по обеспечению надежности отгружать партию модулей потребителю недопустимо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали:

1. В режиме эксплуатации РЛС различного назначения передающие твердотельные СВЧ модули работают в импульсно-периодических режимах при длительности импульсов $t_{и} = 70 \div 300$ мкс и скважностью $Q = 7 \div 21$. Характерной особенностью таких режимов является возникновение периодических колебаний температуры (термоциклов) активной области структуры СВЧ транзисторов.

2. Амплитуда температурных колебаний (термоциклов) активной области структуры СВЧ транзисторов в импульсно-периодических режимах определяется тепловыми характеристиками транзистора, длительностью,

скважностью и амплитудой СВЧ импульсов и может превышать 100°C . Количество колебаний температуры (циклов) за время наработки модулей достигает до 10^{12} .

3. В импульсно-периодических режимах одним из основных механизмов отказов, определяющих ресурс модулей, является развитие усталостных явлений в металлизации СВЧ транзисторов, которые приводят к её разрушению и, как следствие, уменьшению $U_{\text{КЭР}}$ и возникновению необратимого пробоя. Время развития этого механизма зависит от материала металлизации и резко уменьшается при увеличении амплитуды термоциклов ΔT , воздействующих на металлизацию.

4. Другой механизм отказов СВЧ модулей в условиях эксплуатации связан с перегрузками по току потребления вторичного источника питания и отказом силовых транзисторов и (или) токоведущих дорожек на стеклотекстолитовой плате.

5. Для обеспечения заданных показателей надежности СВЧ модулей (средней наработки на отказ при работе в составе радиолокационной станции) необходимо внедрить следующие мероприятия:

- на этапе производства использовать СВЧ транзисторы с Au металлизацией, вместо металлизации Mo-Al, прошедшие контроль по величине $R_{\text{ТИ}}$;
- использовать стеклотекстолит для платы ВИП, с высокой теплопроводностью и увеличенной толщиной проводников;
- проводить отбраковку плат ВИП при повышенной температуре окружающей среды по величине перегрева сердечника трансформатора и токоведущих дорожек;
- обеспечить повышенную устойчивость к возникновению сквозных токов в ВИП за счет увеличения времени задержки между моментом включения и выключения силовых транзисторов во вторичном источнике питания.

– проводить 100% технологический прогон СВЧ модулей в предельно допустимом СВЧ импульсно-периодическом режиме.

6. Результаты проведенных исследований и внедрение вышеуказанных разработанных технических мероприятий позволило на порядок уменьшить интенсивность ранних отказов СВЧ модулей в условиях эксплуатации и обеспечить требуемые значения средней наработки на отказ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф. Физика отказов мощных СВЧ транзисторов при работе в импульсных режимах. // Электронная техника. Серия 2, полупроводниковые приборы, выпуск 2, 2007, стр.91-96
2. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф., Таран П.В. Температурная зависимость развития отказов, обусловленных усталостными явлениями в металлизации СВЧ транзисторов. // Электронная техника, серия 2 полупроводниковые приборы выпуск 1, 2008г., стр.76-78
3. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф., Таран П.В. Отбраковочные испытания твердотельных СВЧ модулей. // Электронная техника, серия 2 полупроводниковые приборы выпуск 2, 2009 г., стр. 78-82
4. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф. Анализ зависимости скорости развития отказов, вызванных усталостными явлениями в металлизации СВЧ транзисторов, от параметров термоциклов. //Тез.докл. IVмеждунар. научно-техн. конф. Информационные технологии в науке, технике и образовании 2008г., VII научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. 2008г., стр.134
5. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф. Механизм внезапных отказов мощных СВЧ транзисторов при работе в импульсных периодических режимах. // Тез.докл. IVмеждунар. научно-техн. конф. Информационные технологии в науке, технике и образовании 2008г. . VII научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. 2008г., стр.134-135
6. Гришаков М.Н., Синкевич В.Ф., Таран П.В. Расчет параметров термоциклов в импульсных периодических режимах работы СВЧ транзисторов. // Тез.докл. IVмеждунар. научно-техн. конф. Информационные технологии в науке, технике и образовании 2008г. . VII научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. 2008г., стр.135
7. Гришаков М.Н., Сидоров В.А. Надежность мощных СВЧ транзисторов с кристаллодержателями из высокотеплопроводных альтернативных ВеО ке-

рамике материалов. // Тез.докл. VII научно-техн. конф. Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА. 2008г., стр.136-139

Цитируемая литература

1. Нечаев А.М., Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф. Механизмы отказов и надежность мощных СВЧ транзисторов. // ЦНИИ Электроника, Москва, 1978, 80 стр.
2. Физические основы надежности интегральных схем. Под редакцией Миллера Ю.Г. // Советское радио, Москва, 1976, 320 стр.
3. Синкевич В.Ф. Физические основы обеспечения надежности мощных биполярных и полевых транзисторов. // Электронная промышленность. Наука. Технологии. Изделия, Москва, 2003, стр. 232-243
4. Kaminski N., Чекмарев А. Циклонагрузочная способность IGBT-модулей АВВ серии HiPak. // Силовая электроника №4, Москва, 2006, стр. 30-33
5. Vashchenko V.A., Sinkevich V.F. Physical Limitations of Semiconductor Devices. // Springer, 2008, 330 pp.
6. Коцаньда С. Усталостное растрескивание металлов. // Пер. с польского, М:Металлургия, 1990, 461 стр.

Подписано к печати 24.03.2010 г.

Формат 60x84 1/16. Печ. л. – 1,72

Тираж 90 экз. Заказ № 4

Отпечатано в типографии ФГУП НПП «Пульсар»

105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27.