

Отбраковочные испытания твердотельных СВЧ модулей

Гришаков М. Н., Синкевич В. Ф., Таран П. В.

Рассмотрены методы отбраковочных испытаний твердотельных СВЧ. Показано, что выбор методики и режимов испытаний существенно влияет на эффективность отбраковки дефектных изделий.

Введение

Используя методы отбраковочных испытаний СВЧ модулей на этапе изготовления серийных образцов, можно выявить и отбраковать изделия со скрытыми дефектами. В результате 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, являются актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

Объект и результаты исследований

Исследовались твердотельные СВЧ модули для РЛС различного назначения.

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

Рекомендуется [1] в качестве внешних факторов при проведении отбраковочных испытаний аппаратуры использовать воздействие циклически изменяющейся температуры, случайной вибрации (ударов) и повышенной температуры.

Воздействие циклически изменяющейся температуры приводит к деформации и термическим напряжениям в элементах аппаратуры, способствует проявлению механических дефектов: растрескиванию и расслаиванию покрытий, разрыву уплотнений паяных соединений и швов в корпусе и т. д. 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 недостатками технологического процесса. Вибрация приводит к возникновению усталостных повреждений в материалах конструкций.

Воздействие повышенной температуры и электрического режима, эквивалентного режиму эксплуатации СВЧ модулей (технологический прогон), приводит к отказам комплектующих изделий, а также межсоединений. Поскольку режим работы СВЧ модулей импульсно-периодический, то в процессе технологического прогона происходит термоциклирование в первую очередь структуры активных, тепловыделяющих элементов, где возникают значительные градиенты температуры [2]. Поэтому этот вид отбраковочных испытаний твердотельных СВЧ модулей важен для данного класса аппаратуры. Исследования, позволяющие выбрать режим и условия проведения технологического прогона твердотельных СВЧ модулей, обеспечивающие высокую эффективность отбраковки

(K_θ – отношение количества отказов, выявленных в процессе отбраковки, к суммарному количеству отказов, выявленных в процессе отбраковки, приёмосдаточных периодических испытаний и эксплуатации), являются значимым фактором в обеспечении качества поставляемых заказчику модулей.

При выборе режима и условий технологического прогона СВЧ модулей устанавливают следующие основные параметры:

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

Очевидно, что режимы отбраковочных испытаний необходимо выбирать максимально жесткими, чтобы выявить все скрытые дефектные модули. Для обоснования и выбора такого режима следует привлечь статистическую модель возникновения отказов.

Обычно износ и отказ полупроводниковых модулей при воздействии термоциклов может быть описан с помощью распределения Вейбула (учёного, открывшего это соотношение при изучении износа металлов). Вероятность возникновения отказа модуля по Вейбулу [3]:

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

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 Вейбула, β – параметр формы.

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

Известно, что число циклов N_γ , после которых поступает определенный процент

$\gamma = \frac{n_0}{n} 100\%$ отказов модулей, связано с амплитудой температурного цикла [3]:

$$N_\gamma = k_1(T) \Delta T^{-k_2}, \quad (2)$$

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, k_2 – параметр формы для формулы Коффина-Менсона (рис. 1).

Параметры k_1 и k_2 должны определяться экспериментально на основе испытаний, по крайней мере, двух выборок модулей при различном значении ΔT . Причём с ростом абсолютного значения T коэффициент k_1 уменьшается.

Резкая зависимость накопленного числа отказов от амплитуды термоциклов ΔT наблюдалась экспериментально при эксплуатации РЛС «Утес-А» и «Утес-Т». Для РЛС «Утес-А» длительность импульсов $t_{\text{И}} = 83$ мкс, скважность $\theta = 27$, импульсная мощность $P_{\text{И}} = 1$ кВт, напряжение питания $U_{\text{п}} = 28$ В. Для РЛС «Утес-Т» длительность импульсов $t_{\text{И}} = 133$ мкс, $Q = 20$, $P_{\text{И}} = 1,3$ кВт, $U_{\text{п}} = 31$ В. Оценка показывает, что для последнего режима амплитуды термоциклов ΔT в $\sim 1,4$ - $1,6$ раза больше, чем для первого режима.

При этом наблюдаемое экспериментальное отношение n_0/n в течение пяти лет непрерывной эксплуатации станций отличается более чем на один порядок. Анализ показал, что основной причиной отказов модулей в эксплуатации являются усталостные явления в многослойной металлизации мощных СВЧ транзисторов.

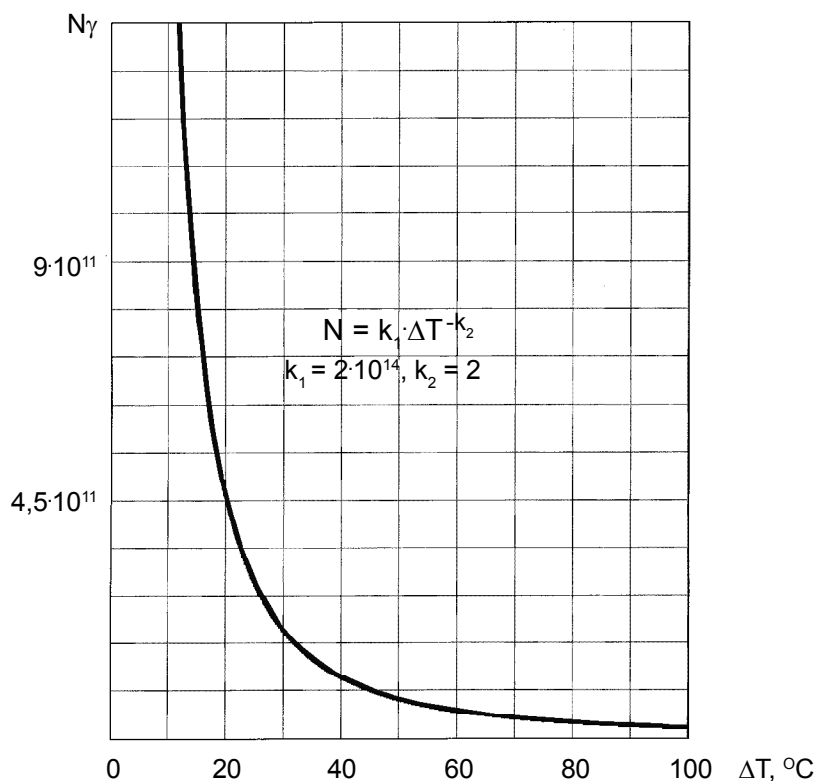


Рис. 1

Зависимость числа циклов, после которых наступает отказ определённого процента модулей (γ) от амплитуды термоцикла

Анализ формул (1) и (2), а также известный факт, что при одинаковом ΔT износые (усталостные) отказы наступают раньше, если значение $T_{\text{макс}}$ выше, позволяют сформулировать требования к параметрам режима технологического прогона модулей, при котором, не превышая допустимые режимы, установленные в ТУ, 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 выбирают на 10-20% превышающее значение, установленное в ТУ;
- время работы модуля во включённом состоянии заведомо 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 около 10 минут).

Для реализации технологического прогона СВЧ модулей в указанном режиме были разработаны и изготовлены стенды, обеспечивающие: задание периодического СВЧ режима; охлаждение модулей с заданной температурой и скоростью воздуха на входе радиаторов; одновременное испытание (прогон) нескольких (4-8 шт.) в

зависимости от типа модулей; периодическое включение и выключение модулей во время испытаний.

При выборе вентилятора для системы охлаждения модулей использовались результаты расчётов [2], показывающие зависимость эффективности охлаждения от скорости воздушного потока в каналах радиатора. Для некоторых стендов использовались вентиляторы, позволяющие регулировать эту скорость в широких пределах.

Результаты испытаний в обобщенном виде представлены на рис. 2.

Зависимость накопленного процента отказов γ от N хорошо описывается законом Вейбула. 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 имеет форму 1 (рис. 2). В отличие от обычного закона Вейбула эта зависимость имеет участок насыщения.

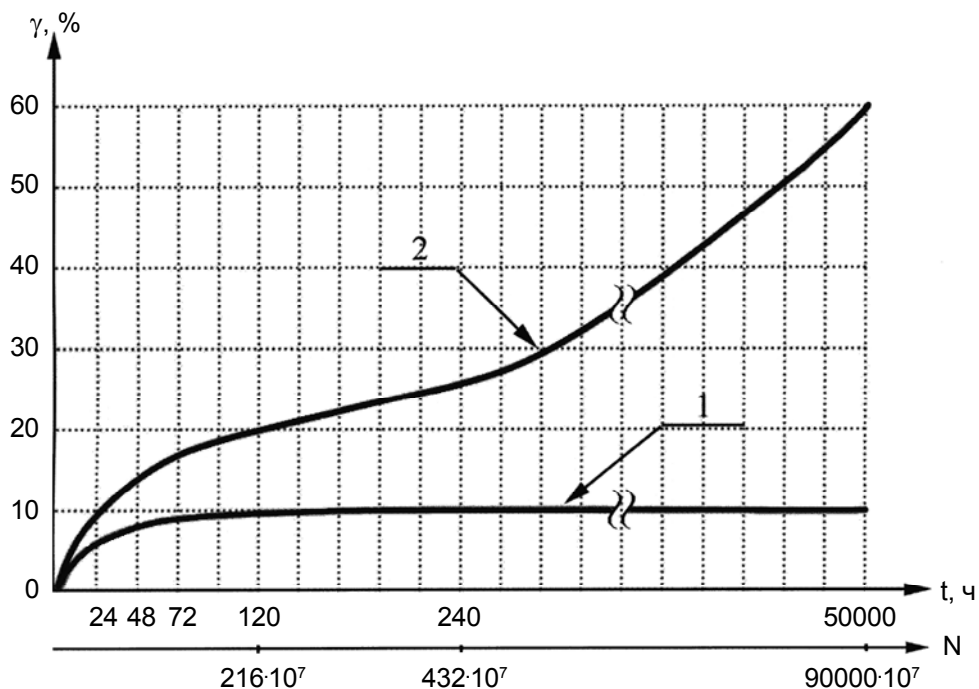


Рис. 2

Зависимость накопленного процента отказов в партии СВЧ модулей от времени наработки t и числа термоциклов N :
1 - партия с высоким уровнем качества; 2 - партия с низким уровнем качества и малым конструктивным запасом

Это свидетельствует о том, что процент дефектных модулей в партии ограничен и через некоторое время, соответствующее определённому числу термоциклов N активных элементов (рис. 2), отказы прекращаются. В зависимости от качества изготовления модулей накопленный процент отказов за время технологического прогона колеблется от 0 до 10%. Причём насыщение процента отказов происходит, как правило, в первые трое суток, что соответствует $N \approx 240$ миллионам термоциклов. При достижении некоторого времени наработки t_γ (и соответственно N_γ), которое может составлять 5-10 лет (это показала реальная эксплуатация), 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 больших значений (20-30% - см. кривая 2 рис. 2) и при увеличении времени прогона процент отказов продолжает расти. В последнем случае без принятия дополнительных мер по обеспечению надёжности отгружать партию модулей потребителю недопустимо.

Выводы

Таким образом, проведённые исследования показали:

- основной причиной отказов СВЧ модулей является воздействие на их структуру мощных энерго- и термоциклов, что приводит к развитию и накоплению разрушений на границе материалов с различным тепловым коэффициентом расширения;

- зависимость накопленного процента отказов СВЧ модулей $\gamma = (n_0/n)100\%$ от числа термоциклов N хорошо описывается на начальном участке распределением Вэйбула. Параметры этого распределения заметно зависят от уровня качества (засоренности дефектами) испытываемой партии модулей. С ростом амплитуды температурных циклов величина $N\gamma$ резко уменьшается;

- технологический прогон СВЧ модулей в предельно допустимом импульсно-периодическом режиме является эффективным средством контроля качества поставляемых заказчику партий и позволяет выявлять дефектные образцы;

- в зависимости от конструкции СВЧ модулей и режимов их работы в условиях эксплуатации гамма-процентная наработка до отказа может составлять 5-10 лет при значении $\gamma = 0,95$.

Литература

1. РДВ 319.02.24-99. Комплексная система контроля качества. Аппаратура военного назначения. Методы проведения отбраковочных испытаний.

2. Ю. П. Докучаев, В. Ф. Синкевич, П. В. Таран. Разработка и производство СВЧ модулей для радиолокационных станций. - Петербургский журнал электроники, 2004, с. 3-4.

3. Н. Каминский, А. Некмарев. Циклонагрузочная способность IGBT – модулей. - Силовая электроника, 2006, №4, с. 30-33.